



**Helena Maria
da Costa Paiva**

**Correlação entre argamassas e betões com base
em análise reométrica**



**Helena Maria
da Costa Paiva**

**Correlação entre argamassas e betões com base em
análise reométrica**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor Paulo Barreto Cachim, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”
Albert Einstein

o júri

Presidente

Prof. Doutor Jorge Adelino Rodrigues da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor José Luis Barroso de Aguiar
Professor Associado com Agregação da Universidade do Minho

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professor Associada da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes
Professor Auxiliar da Universidade do Porto

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Manuel dos Santos Silva
Investigador Auxiliar do LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Agradecimentos

Aos meus caros orientadores, a Dra. Ana Velosa e o Dr. Paulo Cachim pelo apoio e disponibilidade.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, particularmente ao Dr. Santos Silva pela sua disponibilidade e ajuda preciosa. Também à Sra. D^a. Paula Meneses pela colaboração dispensada.

Um agradecimento especial à Eng. Maria Carlos e ao Sr. Vítor Rodrigues pela sua ajuda com sorriso e pelo excelente suporte experimental no laboratório.

A todos os meus colegas da sala de doutoramentos na Universidade de Aveiro, em particular, ao Hugo Rodrigues por me fazer rir nos momentos mais difíceis.

A toda a minha família e amigos, com um carinho particular para o meu marido, por todo o seu apoio e paciência. Aos meus filhos, Tomás e Mafalda, com todo o amor.

palavras-chave

reologia, argamassa, betão, pozolanas, durabilidade, propriedades

resumo

O presente trabalho teve como objetivo principal estudar a correlação no estado fresco e no estado endurecido entre argamassas e betões com pozolanas, nomeadamente, um metacaulino e uma diatomite. Este trabalho procurou também otimizar a utilização dos materiais pozolânicos na produção de argamassas e betões.

O estudo do comportamento reológico inicia-se com a avaliação da argamassa padrão e do betão padrão, utilizando para tal reómetros adequados a cada material. O comportamento reológico das argamassas com pozolanas foi analisado em função do comportamento da argamassa padrão. Verificou-se que é possível ajustar o comportamento reológico de argamassas com pozolanas ao comportamento da argamassa padrão e, deste modo, obter-se também betões correspondentes (com pozolanas) dentro do intervalo de trabalhabilidade pretendido e pré-definido para o betão padrão. Também foi possível concluir que, até um determinado teor de material pozolânico, se verificava uma correlação entre os parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de cedência) das argamassas e os seus betões correspondentes.

Na caracterização das argamassas e betões no estado endurecido, verificou-se a existência de uma correlação entre a resistência à compressão das argamassas e as resistências dos betões correspondentes para a maioria das formulações. Quando o ajuste de trabalhabilidade foi efetuado através da alteração do teor de água, apenas as formulações com metacaulino apresentavam uma relação linear entre as resistências das argamassas e a dos betões correspondentes. Usando um agente redutor de água de amassadura para o ajuste de trabalhabilidade, as formulações com metacaulino continuam a apresentar uma relação linear entre as resistências das argamassas e as resistências dos betões. As formulações mistas, com metacaulino e diatomite, também apresentam uma relação linear entre o valor das resistências das argamassas e dos betões. As composições com diatomite não mostram esta relação linear entre a resistência das argamassas e a resistência dos betões, embora exista uma correlação entre elas.

O estudo de algumas propriedades no estado endurecido de betões mostrou que a utilização de água como elemento de ajuste de trabalhabilidade diminui sempre a resistência à compressão dos betões com o aumento do teor em pozolana. O uso de um agente redutor de água de amassadura, principalmente no caso da utilização do metacaulino, aumenta a resistência dos betões face ao padrão devido à sua maior reatividade pozolânica relativamente à diatomite. Estas tendências para os resultados observados na resistência mecânica foram também visíveis no módulo de elasticidade e justificáveis pela evolução da microestrutura avaliada conjuntamente por porosimetria, análises térmicas e microscopia eletrónica de varrimento.

Finalmente, no estudo da influência dos materiais pozolânicos sobre a durabilidade dos betões, especificamente sobre a resistência à penetração de cloretos, ambas as pozolanas mostraram um efeito bloqueador à penetração de cloretos e, também aqui esse efeito foi mais evidente em composições com metacaulino e na presença de um agente redutor de água de amassadura.

Keywords

rheology, mortars, concrete, pozzolans, durability, properties.

Abstract

This work's main goal was to study the correlation in the fresh and hardened state between mortars and concretes containing pozzolans, namely, a metakaolin and diatomite. This study also sought to optimize the use of pozzolanic materials in the production of mortar and concrete.

The study of the rheological behavior began with the evaluation of a reference mortar and a reference concrete using specific rheometers, appropriate for each material. The rheological behavior of mortars with pozzolans was analyzed as a function of the behavior of the reference mortar. It was found that it is possible to adjust rheological properties of mortars with pozzolans to the behavior of the reference mortar and so also obtain the corresponding concrete (with pozzolans), within the range of desired workability that was pre-set for the standard concrete. It was also concluded that up to a certain amount of pozzolanic material a correlation is verified between the rheological parameters (viscosity and yield stress) of mortars and their correspondent concretes.

The characterization of the mortars and concretes in the hardened state showed that there is a correlation between the compressive strength of the mortars and related concretes for most formulations. When the workability adjustment was made by changing the water content, only formulations with metakaolin showed a linear relationship between the mortars strength and its related concretes strength. Using a water reducing agent to adjust workability, formulations with metakaolin still show a linear relationship between the mortars and concretes mechanical strength. The mixed formulations, with metakaolin and diatomite, also exhibit a linear strength relationship between the mortars and concretes. The diatomite based compositions do not show this linear strength relationship, although there is a correlation between the mortar and concrete.

The study of some concrete properties in the hardened state showed that the use of water for workability adjustment always decreases the compressive strength of concrete when the pozzolan content is increased. The use of a water reducing agent, especially in the case of metakaolin, also increases the concrete strength relative to the reference, due to its higher pozzolanic reactivity compared to the diatomite. This trend in the mechanical strength results were also visible in the elastic modulus and were justified by the evolution of the microstructure, evaluated jointly by porosimetry, thermal analysis and scanning electron microscopy.

Finally, in studying the influence of pozzolanic materials on the durability of concretes, particularly the resistance to penetration of chlorides, both pozzolans showed a blocking effect to the chloride penetration and, also here, this effect was most evident in compositions containing metakaolin and the water reducing agent.

Índice

Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas	15
Simbologia	19
1. Enquadramento	21
2. As argamassas e os betões	23
2.1. Introdução	23
2.1.1. Ligantes	24
2.1.2. Agregados	28
2.1.3. Água de amassadura	28
2.1.4. Adições pozolânicas	30
2.1.5. Adjuvantes	39
2.2. Reologia de argamassas e betões	41
2.3. Métodos de caracterização reológica	48
2.4. Efeito dos componentes de argamassas e betões sobre o seu comportamento reológico	55
2.5. Relação entre propriedades em fresco e em endurecido de argamassas e betões	64
3. Metodologia experimental	67
3.1. Introdução	67
3.2. Caracterização dos materiais	67
3.2.1. Agregados	67
3.2.2. Cimento	69
3.2.3. Materiais pozolânicos	70
3.2.3.1. Caracterização química e mineralógica	70
3.2.3.2. Caracterização física	72
3.2.3.3. Reatividade pozolânica	74
3.2.4. Adjuvantes	76
3.3. Caracterização do comportamento em fresco de argamassas e betões	77
3.3.1. Composição das argamassas e betões	77
3.3.2. Reometria de argamassas	82
3.3.3. Reometria de betão	85
3.4. Caracterização no estado endurecido de argamassas e betões	87
4. Apresentação e discussão de resultados	93
4.1. Comportamento reológico de argamassas e betões	93
4.1.1. Caracterização reométrica da argamassa padrão	93
4.1.2. Efeito da introdução de pozolanas no comportamento reológico de argamassas e betões.	96
4.1.2.1. Incorporação de metacaulino	96
4.1.2.2. Incorporação de diatomite	102
4.1.3. Efeito do teor em água de amassadura sobre o comportamento reológico de argamassas e betões com pozolanas	107
4.1.3.1. Incorporação de metacaulino	108
4.1.3.2. Incorporação de diatomite	113
4.1.3.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite	117
4.1.4. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o comportamento reológico de argamassas e betões com pozolanas	123

4.1.4.1. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o cimento e pozolanas	125
4.1.4.2. Incorporação de metacaulino	129
4.1.4.3. Incorporação de diatomite	135
4.1.4.4. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite	139
4.1.5. Síntese sobre o comportamento reológico	143
4.2. Comportamento no estado endurecido de argamassas e betões	144
4.2.1. Correlação entre a resistência à compressão de argamassas e betões com pozolanas	145
4.2.1.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de argamassas e betões com pozolanas	146
4.2.1.1.1. Incorporação de metacaulino	146
4.2.1.1.2. Incorporação de diatomite	149
4.2.1.1.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite	152
4.2.1.2. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de argamassas e betões com pozolanas	155
4.2.1.2.1. Incorporação de metacaulino	156
4.2.1.2.2. Incorporação de diatomite	158
4.2.1.2.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite	161
4.2.1.2.4. Síntese da análise da correlação entre a resistência à compressão de argamassas e betões com pozolanas	164
4.2.2. Efeito dos materiais pozolânicos sobre algumas propriedades no estado endurecido de betões	166
4.2.2.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de betões com pozolanas	166
4.2.2.1.1. Incorporação de metacaulino	167
4.2.2.1.2. Incorporação de diatomite	181
4.2.2.1.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite	188
4.2.2.2. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de betões com pozolanas	192
4.2.2.2.1. Incorporação de metacaulino	193
4.2.2.2.2. Incorporação de diatomite	199
4.2.2.2.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite	204
4.2.2.2.4. Síntese da análise do efeito de materiais pozolânicos sobre algumas propriedades no estado endurecido de betões	208
4.2.3. Efeito dos materiais pozolânicos sobre a durabilidade de betões	209
4.2.3.1. Determinação do teor em cloretos efetuada por potenciometria, de acordo com norma EN 1015-17: 2000	210
4.2.3.1.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre a resistência à penetração de cloretos em betões com pozolanas	210
4.2.3.1.2. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre a resistência à penetração de cloretos em betões com pozolanas	214
4.2.3.2. Observação do perfil de penetração de cloretos em betões com pozolanas através de um método qualitativo	216
4.2.3.2.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre o perfil de penetração de cloretos em betões com pozolanas	217
4.2.3.2.2. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o perfil de penetração de cloretos em betões com pozolanas	220

4.2.3.4. Síntese do efeito do metacaulino e da diatomite sobre a durabilidade de betões.	223
5. Conclusões	225
Bibliografia	231

Lista de Figuras

Figura 2.1. Modelo do fluxo de um fluido sob ação de corte [Ferraris₂ 1999].

Figura 2.2. Curvas de fluxo para fluidos Newtonianos e não Newtonianos.

Figura 2.3. Variação do torque com o tempo a velocidade de corte constante [J.I. Bhatti and Banfill 1984].

Figura 2.4. Curva de fluxo com histerese de um material cimentício [Khayat et al 2002].

Figura 2.5. Modelo para a destruição estrutural irreversível induzida por ação de corte; (a) Partículas de cimento secam em contacto; (b) Formação de membrana envolvente quando o cimento contacta com água; (c) As pontes das membranas rompem-se sob a ação de corte; (d) Reconstrução das membranas; (e) Em repouso, as membranas aproximam-se para uma distância correspondente ao mínimo de energia repulsiva [Banfill 2003].

Figura 2.6. Esquema de um teste de abaixamento.

Figura 2.7. Esquema de um ensaio com o aparelho LCL.

Figura 2.8. Esquema do reómetro de dois pontos de Tattersal [Ferraris₂ 1999].

Figura 2.9. Valores da viscosidade plástica em função da área superficial total das partículas de cimento e pozolana [Bentz et al 2012].

Figura 2.10. Valores da viscosidade plástica em função do nº total de partículas [Bentz et al 2012].

Figura 2.11. Efeito de componentes sobre os parâmetros reológicos. A mudança de direção causada pelo aumento do teor do componente é mostrada pelas setas [Banfill 2006].

Figura 2.12. Área de histerese em função de várias técnicas de mistura [Williams et al 1999].

Figura 3.1. Agregados: Areia (A), brita bago de arroz (B1) e brita 8-12mm (B2).

Figura 3.2. Difração de Raios-X ao cimento.

Figura 3.3. Difração de RX ao metacaulino.

Figura 3.4. Difração de RX à diatomite.

Figura 3.5. Distribuição de tamanho de partículas para o metacaulino e para a diatomite

Figura 3.6. Procedimento para determinação do teor em absorção de água da diatomite.

Figura 3.7. Misturadora usada para a preparação de argamassas.

Figura 3.8. Misturadora para preparação do betão.

Figura 3.9. Preparação da pasta de cimento e pozolana (2 minutos de mistura).

Figura 3.10. Adição da areia e das britas (1 mais 2 minutos de mistura).

Figura 3.11. Reómetro utilizado na avaliação reológica de argamassas (Viskomat NT).

Figura 3.12. Perfil de velocidade em função do tempo para a caracterização reológica de argamassas.

Figura 3.13. Variação dos valores do torque com o tempo de ensaio.

Figura 3.14. Variação dos valores do torque com a velocidade de ensaio, aos 15 minutos de ensaio (curva de fluxo).

Figura 3.15. Determinação dos coeficientes g e h.

Figura 3.16. Reómetro para betão (BT2 Schleibinger).

Figura 3.17. Análise reológica do betão.

Figura 3.18. Ensaio de abaixamento do cone de Abrams.

- Figura 3.19. Amostra de betão com 28 dias de cura em ambiente controlado e 6 meses em água do mar, cortada em três fatias desde o exterior até ao interior da amostra.
- Figura 3.20. Amostras de betão com geometria cilíndrica.
- Figura 4.1. Variação do valor do torque para a argamassa padrão durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.2 Curva de fluxo para a argamassa padrão, aos 0 minutos de ensaio.
- Figura 4.3. Curva de fluxo para a argamassa padrão, aos 90 minutos de ensaio.
- Figura 4.4. Valores dos parâmetros h e g , determinados na argamassa padrão, aos 90 minutos de ensaio.
- Figura 4.5. Efeito do aumento do teor de substituição do MK sobre o valor do torque, durante o tempo de ensaio.
- Figura 4.6. Imagem de um aglomerado de partículas de metacaulino, obtidas através de MEV
- Figura 4.7. Efeito do aumento do teor de substituição do MK sobre o parâmetro h , proporcional à viscosidade plástica, durante os 90 minutos de ensaio.
- Figura 4.8. Efeito do aumento do teor de substituição do MK sobre o parâmetro g , proporcional à tensão de cedência, durante os 90 minutos de ensaio.
- Figura 4.9. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK.
- Figura 4.10. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função do teor de MK, mantendo a água constante ($w/l=0.6$), para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.11. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função do teor de MK, mantendo a água constante (0.6), para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.12. Efeito do teor de substituição de Diatomite (D) sobre o valor do torque, durante o tempo de ensaio.
- Figura 4.13. Partículas de diatomite, obtidas por MEV.
- Figura 4.14. Efeito do aumento do teor de substituição de D sobre o parâmetro h , proporcional à viscosidade plástica, para os 90 minutos de ensaio.
- Figura 4.15. Efeito do aumento do teor de substituição de D sobre o parâmetro g , proporcional à tensão de cedência, para os 90 minutos de ensaio.
- Figura 4.16. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de D.
- Figura 4.17. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função do teor de D, mantendo a água constante ($0,6$), para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.18. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função do teor de D, mantendo a água constante ($0,6$), para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.19. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

- Figura 4.20. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.21. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.22. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de água de amassadura ajustados.
- Figura 4.23. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.24. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, com o teor de MK, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.25. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de D e, teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.26. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de D e, teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.27. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.28. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de D (0,3, 5, 8 e 10%) e teores de água de amassadura ajustados.
- Figura 4.29. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de D, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.30. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de D, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.31. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK e 3% de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.32. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.33. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.
- Figura 4.34. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de água de amassadura ajustados.
- Figura 4.35. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.36. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.37. Imagem dos aglomerados de metacaulino e diatomite (500x).

- Figura 4.38. Análise da distribuição dos tamanhos de partículas de MK com e sem agente desfloculante (Coulter).
- Figura 4.39. Análise da distribuição dos tamanhos de partículas de D com e sem agente desfloculante (Coulter).
- Figura 4.40. Variação dos valores do torque, ao longo do tempo de ensaio, para uma pasta de cimento sem SP e com 0.5% de SP.
- Figura 4.41. Curvas de fluxo aos 90 minutos para uma pasta de cimento sem SP e com 0.5% de SP.
- Figura 4.42. Variação dos valores do torque, ao longo do tempo de ensaio, para uma pasta de MK sem SP e com 1 e 1,5% de SP.
- Figura 4.43. Curvas de fluxo aos 90 minutos para uma pasta de MK sem SP e com 1 e 1,5% de SP.
- Figura 4.44. Variação dos valores do torque, ao longo do tempo de ensaio, para uma pasta de D sem SP e com 1,5 e 2,5% de SP.
- Figura 4.45. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para uma pasta de D sem SP e com 1,5 e 2,5% de SP.
- Figura 4.46. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.47. Variação do parâmetro h, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.48. Variação do parâmetro g, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.49. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.50. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, para as argamassas com SP e betões correspondentes.
- Figura 4.51. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, para as argamassas com SP e betões correspondentes.
- Figura 4.52. Variação do valor do torque, para a argamassa com 30% de MK e 0,2% de SP para duas velocidades de rotação diferentes comparativamente com a argamassa padrão.
- Figura 4.53. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de diatomite e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.54. Variação do parâmetro h, para as argamassas com diferentes teores de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

- Figura 4.55. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.56. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.57. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de D, para as argamassas com SP e betões correspondentes.
- Figura 4.58. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de D, para as argamassas com SP e betões correspondentes.
- Figura 4.59. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.60. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.61. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.62. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, mantendo a água de amassadura constante.
- Figura 4.63. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.64. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.
- Figura 4.65. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em MK.
- Figura 4.66. Relação linear entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino (5, 10, 15, 20, 25 e 30%) e os seus betões correspondentes.
- Figura 4.67. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em D (0, 3, 5, 8, e 10%).
- Figura 4.68. Relação entre a resistência à compressão das argamassas e correspondentes betões
- Figura 4.69. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em MK e D constante (3%).
- Figura 4.70. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino e diatomite e os correspondentes betões
- Figura 4.71. Variação da resistência à compressão para argamassas com diferentes pozolanas.
- Figura 4.72. Variação da resistência à compressão betões com diferentes pozolanas.

- Figura 4.73. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em MK. O teor de SP foi ajustado para cada composição, com água constante.
- Figura 4.74. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino e diatomite e os correspondentes betões
- Figura 4.75. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em D. O teor de SP foi ajustado para cada composição, com a água constante.
- Figura 4.76. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com diatomite e os correspondentes betões
- Figura 4.77. Variação da resistência à compressão para as argamassas e os betões com diferentes teores em MK e 3% D. O teor de SP foi ajustado para cada composição, com a água constante.
- Figura 4.78. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino e diatomite e os betões correspondentes.
- Figura 4.79. Variação da resistência à compressão para argamassas com diferentes pozolanas e teores de SP ajustados.
- Figura 4.80. Variação da resistência à compressão para betões com diferentes pozolanas e teores de SP ajustados.
- Figura 4.81. Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK e tempo de cura diversos.
- Figura 4.82. Distribuição de tamanho de poros na argamassa padrão aos 7 (azul) e 28 (vermelho) dias.
- Figura 4.83. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK, aos 7 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK)
- Figura 4.84. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK)
- Figura 4.85. Amostra do betão padrão observada por MEV (A- areia; B – brita; C – cimento por hidratar; P – poro).
- Figura 4.86. Amostra do betão padrão observada por MEV.
- Figura 4.87. Betão padrão com área demarcada da análise por EDS.
- Figura 4.88. Composição da pasta de cimento da amostra padrão.
- Figura 4.89. Amostra do betão com 20% de MK observada por MEV (barra: 2 mm).
- Figura 4.90. Amostra do betão com 20% de MK observada por MEV (barra: 400 μm).
- Figura 4.91. Amostra do betão com 20% de MK observada por MEV (barra: 200 μm).
- Figura 4.92. Amostra do betão com 30% de MK observada por MEV (barra: 2 mm).
- Figura 4.93. Amostra do betão com 30% de MK observada por MEV (barra: 200 μm).
- Figura 4.94. Composição do aglomerado de metacaulino.
- Figura 4.95. Mapa de Raios X para a alumina, a sílica e o cálcio, dentro da região demarcada.
- Figura 4.96. Composição elementar da zona demarcada da Figura 4.93.

- Figura 4.97. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de D e tempo de cura diversos.
- Figura 4.98. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com D, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 5% de D; verde: 8% D)
- Figura 4.99. Amostra do betão com 8% de diatomite observada por MEV (barra: 2 mm).
- Figura 4.100. Amostra do betão com 8% de diatomite observada por MEV (barra: 400 μm).
- Figura 4.101. Amostra de betão com 8% de diatomite observada por MEV (barra: 100 μm).
- Figura 4.102. Análise de EDS da diatomite.
- Figura 4.103. Amostra do betão com 8% de diatomite observada por MEV (barra: 200 μm).
- Figura 4.104. EDS da matriz cimentícia na região demarcada.
- Figura 4.105. Amostra do betão com 5% de diatomite observada por MEV.
- Figura 4.106. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK, 3% de D e tempo de cura diversos.
- Figura 4.107. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK variável e 3% D, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 5% MK; verde: 20% MK).
- Figura 4.108. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D observada por MEV (barra: 2 mm).
- Figura 4.109. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D observada por MEV (barra: 400 μm).
- Figura 4.110. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D observada por MEV (barra: 200 μm).
- Figura 4.111. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK e SP em tempo de cura diversos.
- Figura 4.112. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK e SP, aos 7 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK)
- Figura 4.113. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK e SP, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK).
- Figura 4.114. Amostra do betão com 20% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 2 mm).
- Figura 4.115. Amostra do betão com 20% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 400 μm).
- Figura 4.116. Amostra do betão com 20% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 70 μm).
- Figura 4.117. Amostra do betão com 30% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 400 μm).
- Figura 4.118. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de D e SP em tempo de cura diversos.

- Figura 4.119. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas de betões com D e SP, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 5% D; verde: 8% D).
- Figura 4.120. Amostra do betão com 8% de D e com SP, observada por MEV (barra: 2 mm).
- Figura 4.121. Amostra do betão com 8% de D e com SP, observada por MEV (barra: 400 μm).
- Figura 4.122. Amostra do betão com 8% de D e com SP, observada por MEV (barra: 200 μm).
- Figura 4.123. Amostra do betão com 5% de D e com SP, observada por MEV.
- Figura 4.124. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK e SP, com 3% D, em tempo de cura diversos.
- Figura 4.125. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas de betões com MK variável, 3% D e SP (azul: Padrão; vermelha: 5% MK; verde: 20% MK).
- Figura 4.126. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D, com SP, observada por MEV (barra: 2 mm).
- Figura 4.127. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D, com SP, observada por MEV (barra: 400 μm).
- Figura 4.128. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D, com SP, observada por MEV (barra: 200 μm).
- Figura 4.129. Valor de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas (metacaulino com 3% de diatomite) desde o exterior até ao interior das amostras.
- Figura 4.130. Valor de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas (metacaulino com 3% de diatomite) desde o exterior até ao interior das amostras.
- Figura 4.131. Valor de profundidade de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas, com ajuste de trabalhabilidade através do teor de água.
- Figura 4.132. Amostra Padrão e amostra com metacaulino submetidas a ensaio de penetração de cloretos.
- Figura 4.133. Amostra Padrão e amostras com diatomite submetidas a ensaio de penetração de cloretos.
- Figura 4.134. Amostra padrão e amostras com metacaulino e diatomite submetidas a ensaio de penetração de cloretos.
- Figura 4.135. Valor de profundidade de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas, com ajuste de trabalhabilidade através de um agente redutor de água.
- Figura 4.136. Amostra Padrão e amostra com metacaulino e SP submetidas a ensaio de penetração de cloretos.
- Figura 4.137. Amostra Padrão e amostras com diatomite e SP submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

Figura 4.138. Amostra padrão e amostras com metacaulino, diatomite e SP submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

Lista de Tabelas

- Tabela 3.1. Massas volúmica real e aparente dos agregados utilizados.
- Tabela 3.2. Distribuição granulométrica dos diferentes agregados utilizados.
- Tabela 3.3. Análise por fluorescência de Raios-X para o cimento.
- Tabela 3.4. Análise da área superficial e massas volúmicas, real e aparente do cimento.
- Tabela 3.5. Análise por fluorescência de Raios-X para os materiais pozolânicos.
- Tabela 3.6. Análise da área superficial e massas volúmicas, real e aparente, do cimento, do metacaulino e da diatomite.
- Tabela 3.7. Resultados para resistência à compressão apresentadas pelas composições de cal padrão e com substituição por metacaulino e diatomite, a idades e condições de cura diferentes.
- Tabela 3.8. Composição do betão para os componentes sólidos.
- Tabela 3.9. Composição das pastas e argamassas estudadas.
- Tabela 3.10. Formulações de betão estudadas.
- Tabela 3.11. Composição solução aquosa salina artificial.
- Tabela 4.1. Valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com valores crescentes de MK, mantendo constante a água de amassadura.
- Tabela 4.2. Valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams (Abaixamento) para as argamassas e betões com teores crescentes de diatomite, mantendo o teor em água constante.
- Tabela 4.3. Análise dos valores dos parâmetros h, g e do abaixamento para as argamassas e betões.
- Tabela 4.4. Análise dos valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com 0, 3, 5, 8 e 10% de D.
- Tabela 4.5. Análise dos valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com 0, 3, 5, 8 e 10% de MK e 3% de D.
- Tabela 4.6. Valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com valores diferentes de MK e de SP, mantendo constante a água de amassadura.
- Tabela 4.7. Valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com valores diferentes de D e de SP, mantendo constante a água de amassadura.
- Tabela 4.8. Valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com vários teores de MK, 3% de D e teor em SP ajustado, mantendo a água constante.
- Tabela 4.9. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em metacaulino (28 dias de cura).
- Tabela 4.10. Valores de resistência à compressão para as argamassas e betões correspondentes (28 dias de cura).

- Tabela 4.11. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em diatomite (28 dias de cura).
- Tabela 4.12. Valores de resistência à compressão para as argamassas com diatomite e betões correspondentes (28 dias de cura).
- Tabela 4.13. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em metacaulino, e 3% de diatomite (28 dias de cura).
- Tabela 4.14. Valores de resistência à compressão para as argamassas com 3% de diatomite, diferentes teores em metacaulino e respetivos betões (28 dias de cura).
- Tabela 4.15. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com teores em metacaulino de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% e diferentes teores de SP.
- Tabela 4.16. Valores de resistência à compressão para as argamassas e betões correspondentes com teores em metacaulino de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% e diferentes teores de SP.
- Tabela 4.17. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com teores em diatomite de 3, 5, 8 e 10% e diferentes quantidades de SP.
- Tabela 4.18. Valores de resistência à compressão para as argamassas e betões correspondentes com teores em diatomite de 3, 5, 8 e 10% e quantidades ajustadas de SP.
- Tabela 4.19. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em metacaulino, 3% de diatomite e quantidades de SP ajustadas.
- Tabela 4.20. Valores de resistência à compressão para as argamassas e respetivos betões com 3% de diatomite, diferentes teores em metacaulino e quantidades de SP ajustadas.
- Tabela 4.21. Quantidade de Ca(OH)_2 , em betões com metacaulino, calculada a partir de análises térmicas.
- Tabela 4.22. Resultados de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com diferentes teores de MK.
- Tabela 4.23. Quantidade de Ca(OH)_2 , para betões com diatomite, calculada a partir de análises térmicas.
- Tabela 4.24. Resultados obtidos no ensaio de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com introdução de diatomite.
- Tabela 4.25: Quantidade de Ca(OH)_2 , para betões com MK e D, calculada a partir de análises térmicas.
- Tabela 4.26: Resultados de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com introdução de metacaulino e diatomite.
- Tabela 4.27. Teor de Ca(OH)_2 , para betões com MK e SP, calculado a partir de análises térmicas
- Tabela 4.28: Resultados obtidos de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com diferentes teores de MK e SP.

Tabela 4.29: Teor de Ca(OH)_2 , para betões com D e SP, calculado a partir de análises térmicas

Tabela 4.30. Resultados obtidos de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 28 dias para betões com introdução de D e SP.

Tabela 4.31. Quantidade de Ca(OH)_2 calculado a partir de análises térmicas nas formulações mistas.

Tabela 4.32. Porosidade total e diâmetro médio de poro, aos 7 e 28 dias os betões com introdução de metacaulino e 3% de diatomite (porosimetria de mercúrio).

Tabela 4.33. Teor de Cl^- determinado para diferentes composições estudadas e com ajuste de trabalhabilidade com água.

Tabela 4.34. Teor de Cl^- determinado para diferentes composições estudadas e com ajuste de trabalhabilidade com SP.

Tabela 4.35. Profundidade de penetração de cloretos em algumas amostras estudadas. O ajuste de trabalhabilidade foi efetuado com água.

Tabela 4.36. Profundidade de penetração de cloretos em algumas amostras estudadas. O ajuste de trabalhabilidade foi efetuado com SP.

Simbologia

A – área
F – força
v – velocidade de corte
 η - viscosidade
 γ - taxa de deformação
 τ - tensão de corte
 τ_0 - tensão de cedência
T – torque
N – velocidade de rotação
g - coeficiente proporcional à tensão de cedência
h - coeficiente proporcional à viscosidade plástica
MK – metacaulino
D – diatomite
SP – superplastificante
W – água
A – argamassa
B – betão
a/l – razão água/ligante
MEV - microscopia eletrônica de varrimento
EDS – espectroscopia de dispersão de energia
Rc – resistência mecânica à compressão
Rf – resistência mecânica à flexão
E – módulo de elasticidade dinâmico

1. ENQUADRAMENTO

Atualmente, nas aplicações correntes da construção é clara a extrema importância para a correta utilização de betões e argamassas da necessidade de compreensão dos fenómenos associados ao comportamento no estado fresco e no estado endurecido destes materiais bem como à relação entre eles. O impacto sobre a qualidade da aplicação ou sobre a durabilidade destes materiais de construção torna necessário um conhecimento mais aprofundado do efeito da formulação e dos seus componentes sobre as propriedades fundamentais.

Uma vez que as características no estado fresco da argamassa que compõe um betão, designadamente a sua reologia, a sua compacidade e a relação entre a área superficial dos sólidos e o teor de água da mistura, condicionam as propriedades em fresco dos betões que, por sua vez, condicionam as propriedades do material no estado endurecido. Pretende-se com este trabalho estudar o comportamento reológico de argamassas e betões, através da utilização de reómetros específicos para estes materiais e, estabelecer uma correlação entre os resultados de reometria de ambos os materiais. Para além da correlação reométrica, pretende-se obter também uma correlação entre a resistência à compressão dos betões e a resistência das suas argamassas. Espera-se assim também compreender a dependência entre as propriedades em fresco e no estado endurecido dos betões e argamassas correspondentes.

Simultaneamente, como as formulações para as argamassas dos betões incluem frequentemente materiais pozolânicos como substituição parcial do cimento, este trabalho procura também estudar o seu efeito no comportamento reológico e no estado endurecido e, ainda, compreender qual a melhor forma de otimizar a utilização destes materiais.

Neste contexto, o capítulo 2 começa por efetuar uma revisão sobre argamassas e betões relativamente à sua constituição para, de seguida, apresentar os fatores mais relevantes do seu comportamento reológico e no estado endurecido destes materiais de base cimentícia.

O capítulo 3 apresenta a abordagem metodológica experimental desta tese, focando primeiro nos materiais utilizados para as formulações dos betões e depois nos métodos utilizados na sua caracterização quer no estado fresco quer no estado endurecido.

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante o trabalho experimental desenvolvido. Começa-se por apresentar os resultados do estudo do efeito da introdução de materiais pozolânicos, nomeadamente um metacaulino e uma diatomite, sobre o comportamento reológico das argamassas e dos betões correspondentes, para depois avaliar o efeito da alteração do teor em água ou da introdução de um agente redutor de água de amassadura sobre os parâmetros reológicos relativos à viscosidade plástica e à tensão de cedência, respetivamente nas argamassas com pozolanas e nos betões correspondentes. Seguidamente avaliam-se os resultados da resistência à compressão das argamassas e betões correspondentes para compreender o tipo de correlação que possa existir entre elas. Também se discute o efeito da substituição parcial do cimento por pozolanas sobre algumas propriedades dos betões tais como, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. São aqui discutidos fatores como o teor de hidróxido de cálcio presente nas diferentes composições de betão, a distribuição do tamanho de poros e a porosidade total; é também efetuada a avaliação da microestrutura através da utilização de microscopia eletrónica de varrimento. Finalmente, desenvolve-se o estudo do efeito da introdução de pozolanas sobre a durabilidade dos betões, usando para tal dois métodos diferentes.

Finalmente, o capítulo 5 resume as conclusões principais a que se chegaram no contexto do plano de trabalho estabelecido.

2. ARGAMASSAS E BETÕES

2.1.Introdução

A utilização de materiais cimentícios remonta à Antiguidade. Os Egípcios produziram as primeiras argamassas e os gregos e os romanos fabricaram os primeiros betões [Neville 1975]. Para a produção destes materiais usavam como ligante a cal hidratada que não endurecia dentro de água. Para contornar esse problema, misturaram a cal com cinzas de vulcão que vieram a ser denominadas como pozolanas, derivado do nome da vila Pozzuoli, perto do vulcão Vesúvio, de onde este material era originalmente extraído. As argamassas e betões com cal e pozolanas foram usados durante muito tempo até que Louis Vicat compreendeu as causas do endurecimento dos cimentos e das misturas de cal e pozolanas e inventou o cimento artificial, pela cozedura da mistura de argila com calcários finamente moídos. A partir deste momento o betão começou a ser amplamente utilizado devido à sua hidraulicidade e à rapidez com que endurecia [Coutinho 1997, Neville 1975]

Tradicionalmente, as argamassas e betões eram produzidos no local da obra doseando a água com ligantes e agregados. Atualmente a utilização de betão pronto é aceite como parte integrante no processo construtivo e, embora muitas argamassas em aplicação sejam ainda produzidas em estaleiro, o aparecimento de empresas de argamassas secas tem vindo a conquistar uma quota significativa do mercado, oferecendo produtos de qualidade controlada e aos quais é apenas necessário juntar a quantidade de água estipulada para obter o produto final pronto a aplicar [Gonçalves et al 2012].

O desenvolvimento de argamassas e betões, com adjuvantes especiais ou aditivados com materiais pozolânicos permitiu melhorar a qualidade do produto e ir ao encontro de requisitos especiais da construção moderna. Neste âmbito, o investimento em termos da investigação necessária para o desenvolvimento ou otimização das argamassas e betões tem vindo a aumentar consideravelmente no que diz respeito ao estudo das propriedades destes produtos no estado fresco ou endurecido.

De facto, o betão é um dos materiais mais usados na construção, que tem evoluído em termos de formulações e características, não sendo apenas uma mistura simples de cimento, água e agregados. Cada vez mais o betão apresenta na sua composição

adjuvantes, fibras e adições, como, por exemplo, os materiais pozolânicos, de forma a melhorar o seu desempenho. Basicamente, os betões, são materiais compósitos que apresentam na sua composição componentes minerais com características específicas que lhes conferem propriedades especiais e que, se tornam mais controláveis e melhores com a utilização de adjuvantes [Neville 1975; Coutinho 1997; Young et al 1998, Pierre-Claude Aïtcin 2000, Idorn 2005].

As propriedades específicas de betões e argamassas podem ser agrupadas de modo a caracterizar o estado fresco ou endurecido destes materiais. Por outro lado, as características no estado fresco de argamassas e betões condicionam as propriedades do material no estado endurecido. Diversos estudos demonstraram que o comportamento reológico dos betões está intimamente relacionado com a reologia da sua argamassa. Quanto maior a fluidez da argamassa, maior a fluidez observada no betão. Então, a avaliação da reologia da argamassa de um betão é uma boa forma para prever o comportamento reológico do betão [Lamechi et al 2007, Ng et al 2009, Billberg 1999, Okamura et al 2003]. Por outro lado, entre os fatores com maior efeito sobre a reologia das argamassas destacam-se o teor em água, a densidade de empacotamento e a área superficial dos sólidos [Reddy & Gupta 2008].

No entanto, todos os componentes de uma formulação acabam por ter influência sobre o estado fresco ou endurecido destes materiais, destacando-se o papel dos ligantes, agregados, a água de amassadura e as adições e adjuvantes.

2.1.1. Ligantes.

A designação de ligante advém da capacidade que estes materiais possuem de poder aglomerar uma grande quantidade de materiais, conferindo ao conjunto uma grande coesão e resistência. Existem diversos tipos de ligantes tais como o cimento, a cal aérea ou hidráulica, o gesso e ainda algumas resinas orgânicas para aplicações específicas [Coutinho 1997, Hewlett 2001].

O cimento Portland é atualmente o ligante hidráulico mais utilizado na formulação de argamassas e betões. Trata-se de um material constituído por pós muito finos que ao serem misturados com a água formam uma pasta cujo endurecimento acontece apenas pela reação química entre o cimento e a água [Taylor 1972, Coutinho 1997].

Os constituintes principais das matérias-primas do cimento Portland são o óxido de cálcio (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). As matérias-primas (argila e calcário), doseadas de acordo com a composição desejada, são misturadas e sujeitas a temperaturas, em fornos rotativos, da ordem de 1400 a 1650°C, onde por reação química a mistura se converte em clínquer de cimento, o qual é arrefecido de seguida e reduzido a pó. É normal adicionar-se ao clínquer pulverizado uma pequena quantidade de gesso (4-5%) com a função de controlar a presa, obtendo-se assim o cimento [Taylor 1972, Coutinho 1997, Hewlett 2001].

O cimento Portland apresenta quatro constituintes principais, o silicato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), normalmente representado por C_3S , sendo este o constituinte mais importante do cimento Portland na medida em que tem uma forte influência sobre a presa e endurecimento, o silicato bicálcico ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), representado por C_2S , o aluminato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$), designado por C_3A e o aluminoferrato tetracálcico ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) que é representada como C_4AF . O teor de cada constituinte no cimento Portland pode variar dentro de uma gama bastante alargada dependendo das matérias-primas utilizadas. O silicato tricálcico varia entre 20 e 65%, o silicato bicálcico entre 10 e 55%, o aluminato tricálcico entre 0 e 15% e o aluminoferrato tetracálcico pode ocorrer entre 5 e 15% do peso total de cimento. As fases C_3S e C_2S constituem cerca de 75% do peso deste cimento [Smith 1996, Coutinho 1997].

Como o cimento é um sistema multicomponente, a sua hidratação é um processo complexo, que ainda não se encontra totalmente estudado e que consiste numa série de reações químicas individuais que acontecem em paralelo e sucessivamente [Coutinho 1997, Hewlett 2001].

Usando uma abordagem mais simples pode-se considerar que o processo de hidratação do cimento envolve dois mecanismos: (i) a reação em solução, que envolve a dissolução das espécies iónicas (K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} and Ca^{2+}) para a fase líquida, a partir dos compostos anidros do cimento. A concentração de espécies iónicas na solução começa a subir e inicia-se a formação dos primeiros compostos em solução. Quando a concentração de saturação é atingida inicia-se a precipitação de compostos hidratados, tal como o hidróxido de cálcio (CH). (ii) a reação em estado sólido, que ocorre diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro com formação de compostos hidratados como o silicato tricálcico hidratado (C-S-H) [Coutinho 1997, Hewlett 2001].

O progresso da hidratação e a sua cinética são influenciados por fatores como a composição do cimento e presença de iões estranhos à rede cristalina; a distribuição granulométrica das partículas de cimento, especificamente a área superficial; a razão água / cimento; a temperatura; a presença de adições e a presença de adjuvantes. No entanto, considerando a hidratação dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), ambos apresentam C-S-H e CH como produtos da sua reação com a água, embora o C_2S produza menos CH que o C_3S que hidrata mais rapidamente, apresentando um maior contributo para a resistência em idades jovens (até 14 dias). A hidratação do C_2S faz-se de um modo mais lento, contribuindo para a resistência após os 7 dias. A hidratação dos aluminatos de cálcio é extremamente rápida, por isso é adicionado gesso para controlar esta reação. A hidratação do C_3A e do C_4AF , em presença do gesso, dá origem a vários compostos, como o aluminato tetracálcico hidratado ou, o mais importante de todos, o sulfoaluminato de cálcio (etringite, AFt) [Coutinho 1997, Hewlett 2001].

Como foi anteriormente referido, o processo de hidratação é um processo complexo, cuja cinética, à temperatura ambiente, é caracterizada por diferentes estágios [Taylor 1972, Coutinho 1997, Hewlett 2001]:

Período de pré-indução

Imediatamente após o contacto do cimento com a água ocorre uma rápida dissolução de espécies iónicas, presentes no cimento, para a fase líquida. A duração deste período não ultrapassa alguns minutos e este período de hidratação rápida parece ser desacelerado pela formação de uma camada de produtos de hidratação à superfície dos grãos de cimento. Desta forma é criada uma barreira entre o material não hidratado e a fase líquida. A película que se forma é instável e semipermeável.

Período de indução ou dormente

Após o período anterior de rápida hidratação, a velocidade de reação decresce para valores muito baixos durante um período de algumas horas. Durante este estágio os minerais do cimento hidratam de uma forma extremamente lenta.

Este é o período durante o qual o material permanece trabalhável e no qual se torna fundamental conhecer as suas propriedades reológicas.

Período de aceleração

A partir deste momento a reação de hidratação acelera novamente sendo controlada pela cinética de nucleação e crescimento dos produtos da reação. Este período

pode ocorrer de 3 a 12 horas após a mistura e coincide com o início da presa.

A presa consiste na perda progressiva da consistência pastosa da pasta de cimento. O instante em que a pasta inicia essa perda corresponde ao início da presa e, quando deixa de ser deformável, transformando-se numa massa rígida, é o final da presa e o começo do endurecimento correspondente ao período seguinte.

Período de pós-aceleração

Neste período a taxa de hidratação decresce gradualmente à medida que a quantidade de material não hidratado diminui e a reação passa a ser controlada pela velocidade de difusão. Embora a velocidade de difusão seja muito baixa, verifica-se uma reação mensurável que persiste mesmo após meses de cura. A este processo corresponde o fim da presa e início do endurecimento ou cura do material.

Para além do cimento, um ligante hidráulico, que devido à sua reação com a água promove o endurecimento das argamassas e betões, existem ligantes não hidráulicos, tal como a cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) cujo endurecimento se deve à sua reação com o dióxido de carbono (CO_2), denominada reação de carbonatação [Arandigoyen et al 2005]. Após um primeiro estágio de endurecimento por secagem, as argamassas de cal endurecem apenas por carbonatação. A presença de água é essencial para a carbonatação, pois esta ocorre quando o dióxido de carbono se dissolve na água e reage com o hidróxido de cálcio também dissolvido na água. Aparentemente, a taxa mais elevada de carbonatação é conseguida quando existe um mínimo de água nos poros capilares, facilitando a difusão do dióxido de carbono. No entanto, a presença de água adsorvida à superfície das partículas de cal é indispensável para que a carbonatação ocorra. A humidade interna relativa deve ser superior a 30% mas sem atingir o nível de saturação. A difusão do dióxido de carbono através dos capilares diminui cerca de cem vezes em meios com 100% de humidade relativa [Van Balen 1994, Van Balen, 2005]

Um outro ligante, a cal hidráulica, endurece por carbonatação e hidratação. As argamassas que utilizam como ligante a cal hidratada ou a cal hidráulica são usadas principalmente em reabilitação de edifícios antigos.

2.1.2. Agregados

Originalmente, a utilização de agregados dispersos na massa de cimento acontece por razões económicas, já que estes têm menor custo que o cimento. No entanto, a sua adição acrescentou outras vantagens, nomeadamente técnicas, pois em geral o agregado confere ao conjunto maior estabilidade e durabilidade [Neville 1975; Coutinho 1997].

Constituindo os agregados cerca de 70 a 80% do volume de betões e argamassas, é fácil compreender que a sua qualidade assuma um papel muito importante nas propriedades dos materiais de base cimentícia como argamassas e betões [Coutinho 1997; Hewlett 2001]. Os principais fatores que afetam a qualidade dos agregados são o tamanho médio de partícula e a sua distribuição granulométrica, a forma das partículas, a porosidade das partículas e a presença de impurezas [Coutinho 1997, Hewlett 2001].

De uma forma particular, estes fatores vão influenciar a zona de transição interfacial (ZTI), ou seja a zona de ligação entre a pasta de cimento e o agregado. A zona de transição interfacial é caracterizada por porosidade elevada e apresenta uma composição química e mineralógica (elevados teores de Ca(OH)_2) diferente da restante pasta de cimento, de forma que a adesão entre o agregado e o cimento, dentro da zona de transição, é um facto com muita influência na resistência mecânica do betão, na sua permeabilidade e durabilidade [Shi et al 1998; Prokopski et al 2000; Asbridge et al. 2001; Asbridge et al. 2002]. De acordo com estudos realizados [Mitsui et al 1992, Saito et al 1992], depreende-se que a estrutura na zona da ZTI é bastante diferente da estrutura da matriz cimentícia que se encontra a alguma distância. A zona de transição tem uma estrutura complexa onde se formam grandes cristais de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), perpendiculares à superfície dos grãos de agregados, resultando numa estrutura altamente porosa muito pobre em argamassa. A zona de transição (ZTI) é caracterizada por uma porosidade superior [Bourdette et al 1995] e diferente composição química e mineralógica da restante matriz cimentícia [Scrivener et al 1996].

2.1.3. Água de amassadura

A água introduzida na mistura de uma argamassa ou de um betão é fundamental para que as reações de hidratação ocorram, promovendo a ligação entre as partículas de cimento e agregado. A água usada na mistura de argamassas e betões, com ligantes

hidráulicos, pode existir em quatro formas diferentes: água de hidratação, água adsorvida, água intercamadas e água capilar ou livre.

A água de hidratação é aquela que reage quimicamente com o ligante hidráulico e consequentemente integra a estrutura molecular dos produtos da reação de hidratação, incluindo os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Para a remoção desta água quimicamente ligada são necessárias temperaturas entre 150° e 300°C.

A água adsorvida é constituída por moléculas de água que estão fisicamente ligadas à superfície dos sólidos presentes na mistura; desta forma a quantidade de água adsorvida é proporcional à área superficial dos componentes presentes nas argamassas e nos betões. A maior parte deste tipo de água pode ser removida em ambientes com percentagens de humidade relativa (HR) menores que 30%, sendo a remoção da água adsorvida a principal responsável pela retração nas argamassas e betões durante a secagem [Mehta e Monteiro 2005]. Estudos desenvolvidos por diferentes autores [Copeland 1955, Powers 1960] mostraram que a hidratação completa do cimento necessita 0.42g de água por cada grama de cimento. Na prática, são necessárias 0.23 g de água por grama de cimento que reage durante a hidratação, ficando esta quantidade de água como parte integrante do gel de C-S-H. Sobre a superfície do gel de C-S-H são adsorvidas 0.19g de água por grama de cimento hidratado.

A água intercamadas é composta pelas moléculas de água que existem entre as camadas de C-S-H, estando fortemente ligadas por pontes de hidrogénio e, por isso, apenas é possível removê-la em ambientes com humidade relativa menor que 11% mas a sua remoção promove elevadas retrações.

Finalmente, a água capilar encontra-se nos vazios ou canais com dimensões superiores a 5nm. Na gama de 5 a 50 nm os efeitos da tensão superficial podem produzir retração. Nos canais superiores a 50 nm a água encontra-se fora da influência das forças atrativas exercidas pela superfície dos sólidos e a sua remoção não resulta numa retração significativa do material mas origina a criação dos poros capilares [Mehta e Monteiro 2005, Lawrence 2007].

O teor em água de amassadura é um dos fatores mais influentes na trabalhabilidade do material cimentício em fresco, entendendo-se por trabalhabilidade a facilidade de manuseamento e aplicação de uma argamassa ou um betão, que caracterizam a sua adequação a uma determinada utilização, pois as mais pequenas variações no teor de

água implicam mudanças significativas no comportamento reológico das misturas frescas, o que está diretamente relacionado com a concentração de sólidos da suspensão, ou seja, com a sua densidade [Hiemenz 1977, Fonseca 2000]. Por outra perspetiva, relativamente aos materiais já no estado endurecido, observa-se um aumento da porosidade quando há um aumento da razão água/ligante, tendo sido confirmado através da utilização de porosimetria por intrusão de mercúrio em que se observou um maior diâmetro de poros para maiores teores de água de amassadura [Arandigoyen et al. 2005, Fernandes et al. 2005]. Relativamente ao efeito da água de amassadura sobre as características da zona de transição na interface da matriz de cimento/agregados (ZTI), verificou-se que uma diminuição significativa de água de amassadura, possível através da utilização de agentes redutores de água, era um dos métodos que apresentava melhorias apreciáveis [Stroeven et al 2001].

2.1.4. Adições pozolânicas

Atualmente é amplamente aceite a utilização de materiais pozolânicos, como as cinzas volantes e a microsilica, em substituição parcial do cimento Portland, na produção de argamassas e principalmente de betões. Para além da componente ambiental, na medida que esta substituição leva a uma diminuição da emissão de CO₂, a utilização de pozolanas apresenta vantagens técnicas, nomeadamente no que se refere ao aumento da durabilidade do betão relativamente à corrosão, carbonatação e ataque por sulfatos, entre outros, que podem reduzir o tempo de vida útil dos materiais com base na utilização do cimento Portland [Glasser et al. 2008].

Teoricamente, numa hidratação completa cerca de 28% da massa de um cimento Portland é convertida em portlandite (Ca(OH)₂), embora, na prática, a hidratação completa nunca seja atingida formando-se apenas entre 16 a 20% de portlandite [Wild et al 1997]. A presença da portlandite nas argamassas e betões contribui para a redução da durabilidade pois é um material parcialmente solúvel em água e quimicamente recativo em ambientes ácidos [Bai et al 2003, Saikia et al 2006, Tsuneki 2009; Glasser 2008; Nabil 2006].

As pozolanas são materiais, naturais ou artificiais, muito finos, que podem substituir parcialmente o cimento nas argamassas e betões. O componente principal nas

pozolanas é a sílica vítrea ou amorfa que, em presença de água reage com o hidróxido de cálcio ou portlandite, $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, formando compostos com propriedades cimentíceas. Outros materiais pozolânicos têm também alumina amorfa na sua composição que dando origem a aluminosilicatos e, tal como nos cimentos, ao hidratar torna-se muito recativa. A eficácia de um material pozolânico depende da sua reatividade pozolânica, sendo que o termo reatividade pozolânica pode englobar dois fatores, nomeadamente a quantidade máxima de hidróxido de cálcio com que a pozolana pode reagir e a velocidade a que ocorre a reação pozolânica [Hewlett 2001]. No entanto, para além da reatividade pozolânica, estes materiais, por serem muito finos, mostram um efeito “filler”, ou seja, promovem uma diminuição de porosidade total do sistema devido ao preenchimento de vazios de empacotamento e de poros capilares. O mecanismo de empacotamento é extremamente reforçado pela adição de partículas muito finas levando a uma densificação por partículas pequenas. Também ficou demonstrado, através de um sistema de simulação, que as partículas mais finas tendem a concentrar-se perto da zona de transição na interface matriz cimentícia e agregado (ZTI), levando a uma redução de porosidade nessa zona e reforçando a coesão interna, pois verifica-se um aumento das ação das forças de Van der Waals entre as partículas devido ao aumento da proximidade entre elas [Stroeven et al 2001].

A utilização de microsilica como material pozolânico acarreta duas dificuldades, a elevada tendência que esta apresenta para aglomerar e a elevada quantidade de água necessária. De forma a contornar estas dificuldades, as misturas desenvolvidas com microsilica utilizam normalmente agentes redutores de água de amassadura [Chandra, 1997, Alsayed 1998]. Outros autores demonstraram que os aglomerados de microsilica podem induzir, em vez de prevenir, as reações alcali-sílica e, sugerem que os aglomerados de microsilica controlam a reatividade pozolânica de uma forma maior que as partículas individuais [Diamond 1997, Mitchell et al 1998]

Metacaulino

A definição de pozolanas engloba produtos como as cinzas volantes e sílica de fumo, materiais que já fazem parte da produção de algumas classes de betão. Para além da sílica de fumo e das cinzas volantes, o metacaulino (MK) é um dos materiais pozolânicos mais estudado nos últimos tempos. Sabir [Sabir et al 2001, Arikan et al 2009] considera que a temperatura de calcinação da argila rica em caulinite afeta a reatividade pozolânica

do produto resultante (metacaulino). A argila atinge o seu estado mais reativo quando a temperatura de calcinação leva à desidroxilação, resultando num colapso e rearranjo da estrutura da argila, de acordo com a seguinte equação:



O metacaulino é obtido a partir da calcinação de argila rica em caulinite, a temperaturas que podem variar entre 600-800°C dependendo das características da matéria-prima usada, embora alguns autores [Ambroise et al 1986] considerem que a temperatura ótima de calcinação seja de 700°C, para se obter a máxima resistência aos 3, 7, e 28 dias. Estes autores mostraram que para temperaturas abaixo de 700°C a calcinação da argila resulta num metacaulino menos reativo e com maior quantidade de caulinite residual. Acima de 850°C, inicia-se a cristalização diminuindo a reatividade da pozolana [Ambroise et al 1985].

Assim, um processo de calcinação adequado promove uma destruição parcial da estrutura cristalina da caulinite originando uma fase de transição instável e altamente reativa. Deste modo obtém-se um metacaulino com elevada atividade pozolânica, o metacaulino apresenta como componentes principais a sílica e a alumina vítreos que reagem com o hidróxido de cálcio (CH), em presença de água, produzindo principalmente silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (CSH e CAH). Um estudo sobre a influência do metacaulino nas propriedades das argamassas e betões, mostra que são várias as vantagens que a utilização de metacaulino, como substituto parcial do cimento, nomeadamente o aumento da resistência mecânica à flexão e à compressão, a redução da permeabilidade, o aumento da resistência ao ataque químico, aumento da durabilidade, redução dos efeitos da reação alcali-sílica, redução da retração por aumento da densidade do betão devido ao melhor empacotamento das partículas, melhoria da trabalhabilidade e acabamento do betão, redução da tendência para eflorescências e uma melhoria da cor e aparência dos materiais [Siddique et al 2009].

Wild e Khatib [Wild et al 1996] consideram que o metacaulino é um material pozolânico diferente dos outros, não só devido à sua elevada reatividade pozolânica, ou seja, à sua capacidade de reagir a grande velocidade com teores elevados de hidróxido de cálcio, mas também pela sua capacidade de acelerar a hidratação do cimento. O metacaulino parece ter um efeito catalítico sobre a hidratação do cimento, promovendo a

aceleração das reações de hidratação [Lagier et al 2007]. Um estudo de Mostafa [Mostafa et al 2000] compara as reatividades da microsilica e do metacaulino, e determina que o metacaulino apresentava uma maior reatividade pozolânica que a microsilica, devido á sua muito maior área superficial mas, também ao facto da sílica no metacaulino mostrar menor tendência para aglomerar. Utilizando-se formulações de pastas de cimento com microsilica ou metacaulino, sem superplastificante, foi observado que a presença da microsilica ou do metacaulino diminuía a resistência mecânica em idades jovens. Para maiores idades verificou-se que a resistência da pasta de cimento era inferior e que a taxa de subida da resistência no metacaulino era maior do que com a microsilica. Os autores concluíram que as reações pozolânicas eram governadas pela taxa de hidratação do cimento [Mostafa et al 2010].

O estudo [Lagier et al 2007] da influência da composição do cimento Portland sobre as reações do metacaulino em idades jovens levou às seguintes conclusões: (i) o metacaulino parece ter um efeito catalítico sobre a hidratação do cimento, promovendo a aceleração das reações de hidratação e um aumento do calor libertado durante a hidratação inicial. A elevada área superficial do metacaulino parece ser o motivo da aceleração da reação pozolânica e do aumento da temperatura durante a fase inicial da hidratação. Foi proposto que o metacaulino talvez atue como um promotor da dissolução das fases cimentíceas e/ou ao produzirem pontos de nucleação adicionais bem dispersos, para além do aumento da solubilidade do alumínio no sistema, durante as idades jovens de cura. (ii) aparentemente ocorrem reações extremamente exotérmicas entre os metacaulinos e os cimentos estudados, particularmente durante as primeiras 24 horas. Este facto está relacionado com as reações das fases de aluminosilicatos. (iii) a reação dos metacaulinos, durante a fase inicial da hidratação, modifica-se com a composição do cimento. A reação do metacaulino é bastante sensível ao teor de álcalis no cimento. Um aumento na taxa de dissolução do metacaulino com o aumento dos álcalis no cimento, talvez acelere ou intensifique a reação do silicato tricálcico (C_3A).

Khatib [Khatib 2008] considera que substituição parcial do cimento por metacaulino, que é uma pozolana com partículas muito finas, tem uma importante influência na densificação da zona de transição interfacial (ZTI) entre o ligante e o agregado. Este efeito deve-se ao efeito “microfiller” que apresentam as partículas finas de pozolana. Para além deste efeito, devido à elevada reatividade pozolânica do metacaulino,

promovendo a formação de compostos cimentícios adicionais, a introdução de metacaulino aumenta substancialmente a resistência mecânica e a durabilidade do betão. Este autor também mostrou que para uma razão de água/ligante de 0.3, a quantidade ótima de substituição de cimento por metacaulino é de 15%, pois é aquela que apresenta maior resistência mecânica, ocorrendo a maior contribuição do metacaulino para a resistência mecânica aos 14 dias.

Wild e Khatib [Wild et al 1997] estudaram o consumo de hidróxido de cálcio e a resistência mecânica, em pastas e argamassas com substituições de cimento por metacaulino de 0, 5, 10 e 15%. O hidróxido de cálcio, determinado por análises térmicas, apresentou um mínimo aos 14 dias de cura. Este facto foi atribuído a um pico na reatividade pozolânica que promoveu um aumento no consumo de hidróxido de cálcio. Após um ano de cura, observaram quantidades substanciais de hidróxido de cálcio, mesmo para as formulações com 15% de metacaulino, o que sugeria que seria necessário aumentar o teor em metacaulino para que todo o hidróxido de cálcio fosse consumido. De acordo com Wild and Khatib a quantidade de cimento substituído por metacaulino dependem da pureza do metacaulino e do teor de hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento, que é determinado pela composição do cimento e pela razão água: cimento [Wild et al 1997].

Bredy e Pera [Bredy and Pera 1989] utilizaram substituições de MK até 50% e variaram a quantidade de água de amassadura, para manter a consistência constante. Observaram que para teores de MK até 20%, a porosidade total diminuía, começando a aumentar para percentagens superiores a 30%. Khatib and Wild [Khatib 1996], utilizando uma razão água/ligante constante, verificaram um ligeiro aumento no volume de poros para pastas com percentagens em MK até 15%, sendo este aumento proporcional ao teor em MK. A presença de MK promove um refinamento no tamanho de poros na medida em que se observou uma diminuição do tamanho médio de poros e um aumento na quantidade de poros pequenos. Também verificaram que o volume de poros, na presença de MK, diminuía com o tempo de cura até aos 14 dias, aumentando ligeiramente até aos 28 dias após os quais se verifica uma nova diminuição. Este efeito de refinamento de poros pode ser justificado em função da elevada área superficial das partículas de MK, que reagindo com o hidróxido de cálcio produz materiais cimentícios adicionais em forma de gel, no interior dos poros, diminuindo a permeabilidade e, desta forma, aumentando a durabilidade

dos materiais. Khatib and Clay [Khatib et al 2004] estudaram o efeito da substituição de cimento por metacaulino, mantendo o teor em água constante, em percentagens no intervalo de 0 a 20%, sobre a capacidade de absorção de água de betões e verificaram que a presença do metacaulino reduz a penetração de água por ação capilar. No entanto, a absorção de água total, por imersão, a partir dos 28 dias de cura é aumentada nas composições com metacaulino. Bredy and Pera [Bredy et al 1989] utilizaram substituições de metacaulino até 50% e variaram a quantidade de água de amassadura, para manter a consistência constante. Observaram que para teores de metacaulino até 20%, a porosidade total diminuía, começando a aumentar para percentagens superiores a 30%. Siddique e Juvas Klaus [Siddique et al 2009] estudaram o efeito do metacaulino nas propriedades de argamassas e betões. Concluíram que o metacaulino aumenta a resistência mecânica nas idades jovens e esse efeito também se observa para idades mais longas; a substituição parcial do cimento por metacaulino reduz a penetração da água por ação capilar; a presença do metacaulino promove diferenças significativas na composição química da fase do material hidratado em solução dentro dos poros; o metacaulino modifica a estrutura porosa das argamassas e betões, diminuindo a sua permeabilidade o que resulta numa resistência ao transporte da água e, consequentemente reduz a difusão de sais prejudiciais à estrutura; o metacaulino aumenta a resistência das argamassas e betões ao ataque de sulfatos; a incorporação de 10 a 15% de um metacaulino com elevada reatividade basta para controlar a expansão devido a reações álcalis-sílica nos betões, dependendo da natureza do agregado.

Moisés Frias e Cabrera [Moisés Frias et al 2000] estudaram a distribuição do diâmetro de poros e o grau de hidratação de pastas de cimento com metacaulino (10, 15, 20 e 25%) com uma razão água:cimento de 0,55. Verificaram uma diminuição da porosidade total para tempos de cura até 28 dias. Para idades superiores a porosidade total das composições com metacaulino aumenta comparativamente com a formulação só com cimento. Observaram, através da determinação do teor em cal, que o metacaulino se encontra totalmente consumido, nas composições com 10 e 15%, aos 90 dias de cura.

Luc Courard [Luc Courard et al 2003] estudou a durabilidade de betões com diferentes teores de metacaulino (5% a 20%), mantendo a água de amassadura constante. Verificou que as composições com substituições de cimento por metacaulino entre 10 e 15% apresentavam os melhores resultados. Mostravam uma menor diminuição de trabalhabilidade, melhores valores de resistência mecânica e inibiam a difusão de cloretos

e do ataque de sulfatos. Cassagnabère [Cassagnabère et al 2009] verificou que a substituição de 25% (massa) de cimento por metacaulino, em betões com dois cimentos diferentes, promovia um aumento significativo nos valores da resistência à compressão para 1 dia de cura. Obteve um aumento de 25% para o betão (cimento C_2) com uma razão molar C_3S/C_2S de 4.58 e um aumento de 40% para o betão (cimento C_1) com uma razão molar C_3S/C_2S de 3.13. A resistência obtida aos 28 dias era idêntica para os dois betões. A melhoria da resistência a 1 dia de idade pode ser explicada pela reação pozolânica devido ao metacaulino (sob condições de cura com vapor de água). Esta reação foi observada através do consumo de hidróxido de cálcio e pelo aumento na quantidade das fases hidratadas CSH e CAH. Este aumento da fase hidratada foi mais pronunciado quando o metacaulino foi combinado com o cimento menos reativo C_2 , o que estava de acordo com os resultados mecânicos obtidos. Cassagnabère [Cassagnabère et al 2009] considerou que, em termos práticos, estes resultados são bastante importantes para a indústria do betão pré-fabricado que exige alto desempenho mecânico inicial, conseguindo-o com um cimento C_2 , financeiramente mais favorável.

Outros estudos [Kim et al 2007, Parande et al 2008] também concluíram que a utilização de metacaulino incrementava a resistência mecânica e a durabilidade de betões.

Um estudo de Rodríguez-Camacho [Rodríguez-Camacho et al 2002] mostra, através da utilização de diferentes pozolanas, que a resistência à penetração de sulfatos aumenta tanto mais quanto maior for a sua reatividade pozolânica. Especificamente, no caso da penetração de cloretos, este facto está relacionado com a capacidade dos produtos das reações de hidratação e pozolânicas apresentarem para ligar os iões cloreto, impedindo-os de difundir para o interior do material. Simultaneamente as reações de hidratação e pozolânicas, que ocorrem dentro dos poros capilares, densificam os materiais dificultando também a difusão dos iões cloreto para o interior [Bai et al 2003; Martin-Perez et al 2000].

Apreciando todo o trabalho que já foi feito, até ao momento, sobre a substituição de cimento por metacaulino, verifica-se que a utilização deste material pozolânico leva a melhorias no comportamento das argamassas e dos betões. Este efeito benéfico deve-se principalmente à elevada reatividade pozolânica do metacaulino que, por um lado reage rápida e extensamente com o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do cimento e, por outro lado acelera a reação de hidratação do cimento. Da reação do metacaulino com o hidróxido de cálcio formam-se materiais cimentíceos adicionais; em acréscimo verifica-se

uma diminuição do teor em hidróxido de cálcio, o que implica uma melhoria na resistência ao ataque químico e às reações álcalis-sílica. O silicato de cálcio hidratado formado encontra-se na forma de gel que penetra nos poros promovendo um refinamento da porosidade devido à diminuição do tamanho médio de poros e ao aumento da quantidade de poros menores, este efeito é observado também na zona de transição interfacial entre o ligante e o agregado, verificando-se uma densificação. O refinamento dos poros e a densificação da zona de transição interfacial permitem justificar as melhorias na resistência mecânica, a diminuição da absorção de água por ascensão capilar, o melhoramento da resistência ao ataque químico e o aumento da durabilidade [Spoon et al 2006].

Diatomite

A diatomite (DT) é um material natural, proveniente de uma rocha sedimentar, constituída principalmente pela deposição de organismos microscópicos com uma carapaça de sílica cristalina e amorfa [Degirmenci et al 2009]. A diatomite pode ser usada como pozolana, diretamente após moagem ou após um tratamento térmico a cerca de 1000°C seguido de moagem. A diatomite sujeita a tratamento térmico mostra um aumento do teor em sílica amorfa e apresenta um menor tamanho de partícula após moagem. Por outro lado, a calcinação queima a matéria orgânica o que favorece a sua utilização, como substituto parcial do cimento, nos materiais cimentícios [Yilmaz et al 2008]. Kastis [Kastis et al 2006] ao estudar as propriedades e hidratação de misturas de cimento e diatomite chegou às seguintes conclusões: a diatomite pode ser caracterizada como pozolana natural de acordo com a norma EN 197 relativamente ao teor em sílica ativa; cimentos mistos, com teores de diatomite até 10%, desenvolvem a mesma resistência que o correspondente cimento Portland; a adição de diatomite resulta numa maior necessidade de água; a reação pozolânica da diatomite resulta em maior quantidade de produtos hidratados, especialmente para tempos de cura de 28 dias.

Fragoulis [Fragoulis et al 2005] estudou diatomites gregas em diferentes percentagens de substituição do cimento, usando diferentes teores de água de amassadura para manter uma mesma consistência. Verificou que a adição de diatomite ao cimento resulta num aumento do tempo para o início e fim de presa e que a resistência à compressão era aumentada pela presença de diatomite com teores de sílica amorfa superiores a 36%.

Degirmenci [Degirmenci et al. 2009] estudou o efeito da introdução de diatomite em argamassas como substituto parcial do cimento. Utilizou teores de substituição de 5, 10 e 15% de diatomite, mantendo a quantidade de água constante. A resistência mecânica das argamassas diminuiu com o aumento em teor em diatomite. Contudo, as composições com 10 e 15% de diatomite mostraram maior resistência a ciclos de gelo-degelo. A absorção de água das argamassas diminuiu com o aumento em teor de diatomite excepto para a composição com 15% de diatomite, considerando-se que a porosidade natural da diatomite é a principal razão para este comportamento. A resistência ao ataque de sulfatos aumentou com o aumento da quantidade de diatomite introduzida. Papadakis [V.G. Papadakis 1999, V.G. Papadakis 2000] em dois estudos observou que o incremento da resistência final em betões era proporcional à quantidade de fase vítrea ou amorfa presente. Este autor também implementou um fator de eficiência aplicado a materiais pozzolânicos. O fator de eficiência, ou valor K , é definido como a parte do material pozzolânico, num betão com cimento e pozzolana, que pode ser considerada equivalente ao cimento, ou seja, apresenta as mesmas propriedades que o betão apenas com cimento. Considera que este valor de K pode ser aplicado para prever o comportamento de betões com incorporação de pozzolanas [Papadakis et al 2002].

A atividade pozzolânica e hidráulica de adições minerais siliciosas dependem muito do seu estado cristalino/amorfo e também do tamanho e forma de partícula [Rahhal et al 2009]. O estudo da diatomite como substituto parcial do cimento é ainda recente; alguns autores demonstraram que a sua utilização na produção de argamassas e betões não melhorava as suas propriedades mecânicas [Aydin 2007, Degirmenci et al 2009]. Uma das desvantagens da utilização da diatomite na produção de argamassas e betões é a necessidade de uma quantidade de água muito elevada que promove uma redução na resistência mecânica [Yilmaz 2008, Stamatakis et al 2003]. Ali Ergün [Ali Ergün 2011] estudou o efeito da diatomite sobre as propriedades mecânicas de um betão. Utilizou teores de substituição do cimento por diatomite de 5, 7,5 e 10%, mantendo a água constante e usando um teor constante de agente redutor de água de amassadura. A resistência à compressão dos betões com diatomite aumentou. Ergün considerou que este comportamento se devia à combinação de uma pozzolana com sílica amorfa muito reativa com um agente redutor de água de amassadura que permite a utilização de menor quantidade de água.

2.1.5. Adjuvantes

Designa-se por adjuvante a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa de cimento, adicionada durante a amassadura aos componentes normais das argamassas e betões, com a finalidade de modificar certas propriedades destes materiais, quer no estado fluido, quer no estado sólido ou na passagem de um estado para o outro.

A utilização de adjuvantes tem sempre um efeito sobre a trabalhabilidade dos materiais cimentícios em fresco. Esta influência deve-se à sua ação sobre a velocidade de hidratação inicial e à sua ação de regulação das propriedades reológicas do material cimentício fresco. Adjuvantes com forte influência na reologia e que são bastante utilizados em argamassas e betões são os denominados plastificantes ou agentes redutores de água de amassadura. Estes adjuvantes permitem a redução da quantidade de água de amassadura e fluidificam o material, ou seja, possibilitam diminuir a água de amassadura mantendo a trabalhabilidade desejada ou então aumentar esta sem subir a dosagem de água [Coutinho 1997, Young 1998, Hiemenz 1977, Rixom 1999]. Este tipo de adjuvante é constituído por uma categoria de substâncias designadas como tensioativas. Estas substâncias possuem propriedades físico-químicas que modificam a tensão superficial do solvente, neste caso, a água.

Os agentes plastificantes mais utilizados apresentam como substâncias ativas bases os linhossulfonatos, os polihidroxicarboxílicos e as resinas alcalinas. Estas substâncias possuem moléculas longas com uma extremidade hidrófila, formada por grupos hidrocarboxílicos, por sais destes ácidos, como os carboxilatos de sódio, cálcio ou outros, por grupos do ácido sulfónico ou por sais destes ácidos tais como os sulfonatos de sódio [Coutinho 1997, Rixon 1999, Hewlett 2001]. A outra extremidade, hidrófoba, pode ser constituída por uma cadeia alcalina simples, mais ou menos ramificada, podendo conter núcleos benzénicos, linhossulfónicos, naftalénicos ou outros. A extremidade hidrófila, quando em contacto com a água ioniza-se e a sua função é a de baixar a tensão superficial da superfície onde a molécula de tensioativo está adsorvida [Coutinho 1997, Young 1998, Rixon 1999, Hewlett 2001].

Na mistura de uma argamassa apenas com água, as partículas do material vão flocular e aglomerar pelas tensões capilares devidas à presença da água e do ar, arrastado pelos componentes da argamassa. Na presença de um plastificante, quando as partículas do material entram em contacto com a água, estas são mais eficientemente molhadas pelo

líquido devido à adsorção da parte hidrófoba da molécula de dispersante, de forma que a parte hidrófila, ionizada, confere às partículas uma carga elétrica do mesmo sinal, criando um potencial e uma repulsão electrostática. Este potencial orienta por sua vez os dipolos que constituem as moléculas de água, em volta das partículas, formando uma camada de moléculas de líquido que impede a aproximação entre as partículas e favorece a expulsão do ar presente.

Desta forma, a dispersão e estabilidade dos grãos de material é obtida pela conjugação de três fatores, a redução da tensão intersuperficial, aumento do potencial eletrocinético e formação de uma camada protetora e aderente de moléculas de água. Como consequência, a água que separava os grãos de material, quando não existia o dispersante, fica livre entre as partículas dispersas. Por outro lado, a camada de água em redor das partículas diminui o atrito entre elas, melhorando o fluxo do material ou possibilitando a redução da própria água sem alterar a trabalhabilidade do material, daí estes adjuvantes serem denominados redutores de água de amassadura [Coutinho 1997, Hewlett 2001].

A eficiência dos plastificantes, redutores de água de amassadura, é determinada pela composição química do cimento, em particular pelo teor em aluminato tricálcico, considerando-se tanto menos eficaz quanto menor o teor de aluminato tricálcico no cimento usado na argamassa. O aumento das dosagens de plastificante pode impedir as reações de hidratação do cimento e comprometer o endurecimento do material [Coutinho 1997, Young 1998, Rixon 1999, Hewlett 2001].

Existe uma nova classe de adjuvantes, denominados superplastificantes, que permitem fluidificar os materiais cimentícios ou aumentar a sua resistência ultrapassando essas dificuldades, pois podem ser usados em dosagens maiores sem inibir as reações de hidratação. Com estes materiais não há distinção na adsorção pelos componentes principais do clínquer e a sua capacidade de dispersão é superior, permitindo reduzir muito a razão água/cimento para trabalhabilidades iguais, sem influência no processo de hidratação. O problema destes materiais, para além do seu custo, pois são sintéticos, é o facto de que embora o seu efeito como fluidificante seja muito intenso ele desaparece ao fim de um determinado tempo, sendo necessário proceder a novas adições [Coutinho 1997, Rixon 1999].

Existem outros tipos de adjuvantes que são utilizados em argamassas e betões como os agentes retentores de água, os agentes introdutores de ar ou ainda os agentes

retardadores ou aceleradores de presa, entre outros, e que acabam por influenciar o comportamento no estado fresco e no estado endurecido.

2.2. Reologia de argamassas e betões

A reologia é a ciência do fluxo e deformação de materiais, quando submetidos a uma tensão, sob determinadas condições termodinâmicas ao longo de um intervalo de tempo [Hiemenz 1977, Fonseca 2000].

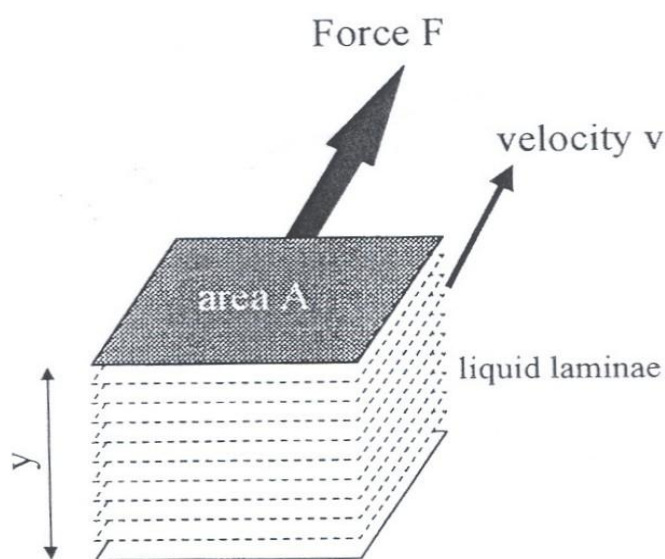


Figura 2.1. Modelo do fluxo de um fluido sob ação de corte [Ferraris₂ 1999].

O fluxo de material está relacionado com os movimentos de camadas adjacentes dos elementos de fluido, ou seja, quando uma força de corte é aplicada a um fluido, um gradiente de velocidade é induzido sobre ele (figura 2.1). O fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade é denominado viscosidade e o gradiente de velocidade é igual à taxa de deformação. A viscosidade é a medida da resistência interna ou fricção interna de uma substância ao fluxo quando submetida a uma tensão. Quanto mais viscosa a massa, mais difícil de escoar e maior o seu coeficiente de viscosidade [Bailey et al 1998].

Um fluido que obedece a esta relação é denominado de Newtoniano e comporta-se de acordo com a equação $F/A = \tau = \eta \cdot \gamma$, onde η é a viscosidade, γ é a taxa de deformação, τ é a tensão de corte, F é a força de corte e A a área do plano paralelo à força.

Na figura 1.3 podem observar-se diversos comportamentos de fluidos Newtonianos e não Newtonianos independentes do tempo [Hiemenz 1977, Ferraris₁ 1999, Banfill 2003].

Nos fluidos newtonianos, devido ao facto de a relação entre a tensão de corte e a taxa de deformação dar origem a uma reta que passa pela origem do gráfico e ao facto da viscosidade ser constante, a medição da deformação para uma única velocidade de corte é suficiente para o caracterizar, ou seja, basta a viscosidade para avaliar as propriedades reológicas do fluido.

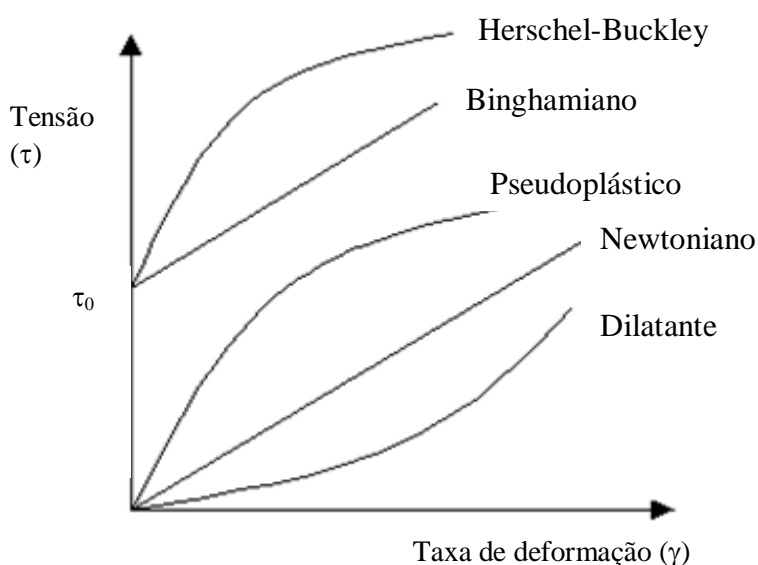


Figura 2.2. Curvas de fluxo para fluidos Newtonianos e não Newtonianos.

Outros fluidos apresentam um comportamento mais complexo e são referidos como não Newtonianos (figura 2.2). São exemplos característicos os fluidos pseudoplásticos ou Binghamianos.

Os fluidos pseudoplásticos, descritos através da equação $\tau = A\dot{\gamma}^n$, são fluidos que apresentam um comportamento não linear com a aplicação da força. Especificamente, quando $n < 1$ estes fluidos apresentam um comportamento tal que fluidificam sob ação de corte. Quando $n > 1$, apresentam um comportamento dilatante ou espessante perante a ação de corte. Em ambos os casos, trata-se de um comportamento não-linear, onde a viscosidade não é uma constante [Hiemenz 1977, Banfill 1994, Fonseca 2000].

Os fluidos Binghamianos são caracterizados por uma relação do tipo $\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$. Apresentam uma relação linear entre a tensão e a taxa de deformação a partir de um determinado valor da tensão de corte (tensão de Bingham ou tensão de cedência, τ_0). Isto é,

são materiais que resistem sem fluir a tensões de corte inferiores à tensão de cedência, mas acima desta apresentam um comportamento linear entre a tensão de corte e a taxa de deformação, sendo caracterizados por uma viscosidade plástica (η).

As propriedades reológicas das argamassas e principalmente dos betões frescos, designadamente a sua viscosidade plástica e a sua tensão de cedência são de extrema importância para a produção desses materiais pois, afetam a sua trabalhabilidade e consequentemente a sua aplicação. Estas propriedades também influenciam a produtividade e qualidade destes materiais cimentícios, concretamente a suas propriedades mecânicas e, especificamente, no caso do betão, a sua durabilidade. Então, a caracterização adequada das propriedades reológicas torna-se necessária para o controlo da qualidade do material fresco, de forma a assegurar a durabilidade das estruturas de betão [Chidiac et al 2009].

A análise mais simples do comportamento viscoelástico envolve o modelo de Bingham [Banfill 1994, Ferraris 1999]. De facto, existem vários modelos propostos para a caracterização reológica dos materiais cimentícios mas, o comportamento descrito pelos modelos Binghamiano ou Hershel-Buckley normalmente são os mais amplamente aceites [Roussel 2006, Chidiac et al 2009]. No modelo Binghamiano, o material é um sólido elástico a tensões de corte (τ) inferiores à tensão de cedência (τ_0), mas apresenta um comportamento viscoso a tensões de corte superiores, sendo μ a viscosidade plástica e γ a taxa de deformação. É importante salientar que a viscosidade apenas pode ser medida se a tensão de cedência for excedida. Para o material, a tensão de cedência é o valor no ponto de interceção da reta com o eixo da tensão, e a viscosidade plástica é o valor do declive da reta [Banfill 1993, Ferraris 1999, Banfill 2003].

Uma simples observação visual pode confirmar a existência de uma tensão de cedência, pois o material é capaz de suportar o seu próprio peso. A tensão de cedência resulta das forças de atracção entre moléculas ou partículas sólidas em suspensão [Banfill 1994]. Em suspensões concentradas de sólidos em líquidos, tal como os sistemas cimentícios, a proximidade das partículas dá origem a fortes interações, cuja força depende da forma das partículas, do seu tamanho e distribuição de tamanhos, concentração, tipo de superfície e da composição do líquido [Banfill 2003].

Normalmente, devido ao movimento aleatório das partículas que provoca o choque entre elas e consequente aglomeração, existe uma atracção natural que causa

floculação. O tamanho e forma dos flocos são os principais responsáveis pela reologia das dispersões. Através de agitação vigorosa, os flocos são separados nas suas partículas primárias, sendo este processo acompanhado de uma redução da resistência ao fluxo. Retirada a agitação verifica-se uma refloculação e aumento da resistência ao fluxo e, se esta recuperação da estrutura for completamente reversível, é denominada tixotropia. No caso de pastas de cimento e argamassas é preferível falar em destruição e reconstrução da estrutura uma vez que se verifica que a estrutura destruída não é totalmente recuperada, ou seja, existe uma destruição estrutural irreversível [Banfill 2003].

Nos materiais cimentícios as propriedades de fluxo são governadas pela interface entre o sólido e a água e, em termos de área superficial de contacto, a contribuição dominante é devida à interface cimento/água. Este facto é progressivamente diluído pelo aumento de teor em agregados. Outro fator que afeta as propriedades de fluxo é o tamanho de partícula dos agregados. A tensão de cedência e a viscosidade plástica aumentam com o tamanho dos agregados sendo a destruição estrutural irreversível mais significativa nas pastas de cimento, verificando-se ainda a sua ocorrência nas argamassas mas já não sendo detetada em betões [Tattersal e Banfill 1983, Banfill 2003].

Enquanto medições a uma velocidade de corte são suficientes para caracterizar um fluido Newtoniano, nos líquidos não Newtonianos são necessárias mais do que uma velocidade. Em teoria duas velocidades seriam suficientes, mas é preferível utilizar uma sequência de velocidades para garantir um mínimo de erros experimentais [Banfill 1994, Banfill 2003]. A partir desta sequência de velocidades torna-se possível desenhar a curva de fluxo, tensão de corte em função da deformação, e através da ordenada na origem determinar a tensão de cedência e pelo declive da reta obter a viscosidade plástica do material.

Os fluidos Binghamianos mostram um comportamento dependente do tempo, na forma de uma redução na taxa de deformação, sendo este efeito mais visível para velocidades de corte elevadas. Na figura 2.3 pode observar-se este efeito. Estes materiais sofrem destruição estrutural quando submetidos a uma ação de corte, indicada pelo decréscimo do torque medido com o tempo [Bhatty et al 1984].

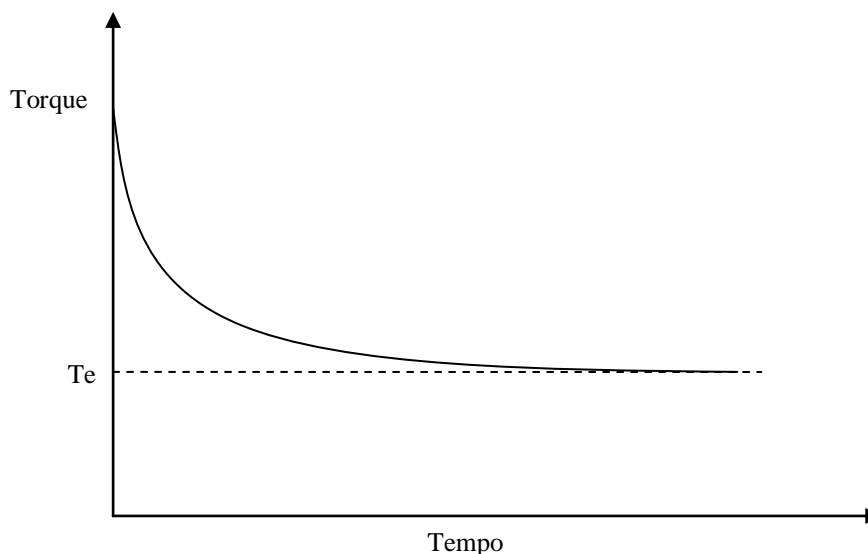


Figura 2.3. Variação do torque com o tempo a velocidade de corte constante [J.I. Bhatti and Banfill 1984].

Quando se atinge o valor de equilíbrio do torque (T_e) a estrutura pode estar totalmente destruída ou então existe equilíbrio entre a velocidade de destruição e a velocidade de reconstrução. Esta destruição estrutural, causada pela tensão de corte aplicada durante o decorrer do teste, também provoca um comportamento de histerese na curva de fluxo [Banfill 1994]. Banfill e Saunders [Banfill et al 1981] demonstraram que a forma da curva de histerese depende do tempo, de subida e descida, utilizado para o ciclo de teste. Se para ciclos curtos se observa apenas destruição estrutural, à medida que o tempo do ciclo aumenta, começa a verificar-se a existência de reconstrução estrutural. Estes autores explicaram estas alterações em termos de uma competição entre a destruição induzida pela ação da tensão de corte e a reconstrução induzida pela hidratação, enquanto outros como Hattori e Izumi explicam o efeito em termos de competição entre processos de coagulação e desfloculação [Hattori 1991].

A tensão de cedência e a viscosidade plástica, em qualquer momento, dependem da história prévia da amostra, incluindo a força aplicada na sua preparação, no seu manuseamento e no decurso do teste [Banfill 1994]. De facto, Banfill [Banfill 1987, Banfill 1992] comprovou a importância da história prévia de corte na amostra submetendo a mesma argamassa a diferentes procedimentos de mistura (manual, automática a baixa e a alta velocidade). Verificou que a área encerrada na curva de histerese resultante ia diminuindo progressivamente, desaparecendo para a velocidade mais rápida de mistura, o

que significa que a curva de fluxo se apresenta sem histerese, ou seja, ocorre destruição estrutural completa. Khayat et al [Khayat et al 2002] consideram que a área confinada em cada curva de fluxo é proporcional à energia necessária para destruir a estrutura (Figura 2.4). Williams et al [Williams et al 1999] medem a extensão da destruição estrutural desta forma, variando parâmetros como a velocidade de mistura e o tipo de misturadora.

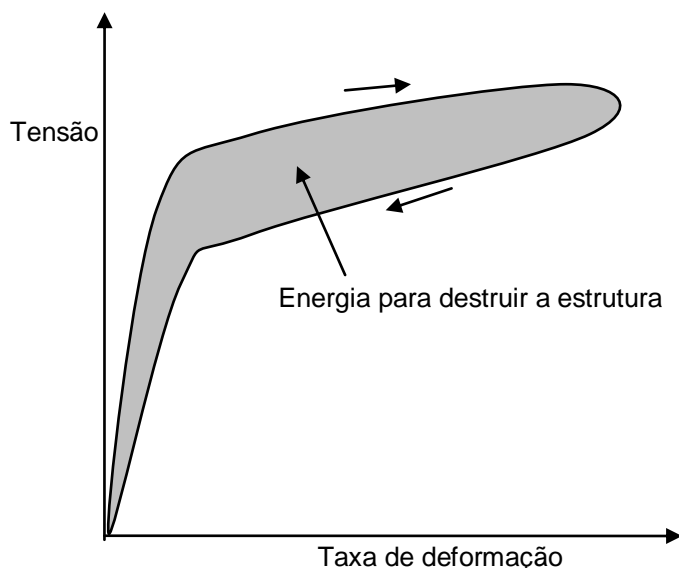


Figura 2.4. Curva de fluxo com histerese de um material cimentício [Khayat et al 2002].

A curva de histerese evidencia que ocorre destruição estrutural durante os testes, sendo possível obter uma infinidade de curvas de histerese por alteração dos parâmetros experimentais. Em consequência, as curvas de histerese não permitem caracterizar sem ambiguidade a destruição estrutural nos fluidos Binghamianos. No entanto, se a estrutura for completamente destruída na preparação e manuseamento do material, a curva de fluxo descendente, correspondente à descida da velocidade de corte, comporta-se de acordo com o modelo de Bingham, sendo possível determinar a tensão de cedência e a viscosidade. Alternativamente, quando a preparação e manuseamento das amostras não destrói completamente a estrutura, mas decorre de acordo com um procedimento padrão, torna-se possível manter sempre a mesma quantidade de estrutura por destruir aquando do início do teste. Neste caso, a viscosidade e tensão de cedência determinadas, são de confiança como indicadores das propriedades de fluxo, numa escala quantitativa relativa [Banfill 1994].

Tattersal e Banfill propuseram um modelo para explicar a destruição estrutural irreversível, o qual tinha em atenção a formação instantânea de uma membrana de minerais hidratados, em redor dos grãos de cimento (período de indução). Esse modelo considera

que quando o cimento seco entra em contacto com a água, se forma uma membrana de produtos hidratados em redor de grupos de partículas. Por ação da tensão de corte essa membrana é rompida e as partículas separam-se. A região onde uma partícula se encontra em contacto com outra é exposta, hidratando para “cicatrizar” a interrupção na membrana. Devido a esta “cicatrização”, quando a tensão é retirada, não é possível repor as ligações tal como se encontravam antes da aplicação da tensão, logo a destruição das ligações é irreversível (figura 2.5). Neste modelo, a estrutura destrutível é devida às ligações por pontes das membranas, enquanto o valor da tensão de cedência é devido a forças de floculação [Tattersal et al 1983, Banfill 1992].

Banfill também confirmou que as argamassas, tal como o cimento, apresentam destruição estrutural irreversível e que na curva de velocidade de corte descendente, estas se comportam de acordo com o modelo de Bingham [Banfill 1995]. Deve-se ter em consideração este modelo de destruição/reconstrução de estrutura durante qualquer procedimento de caracterização reológica.

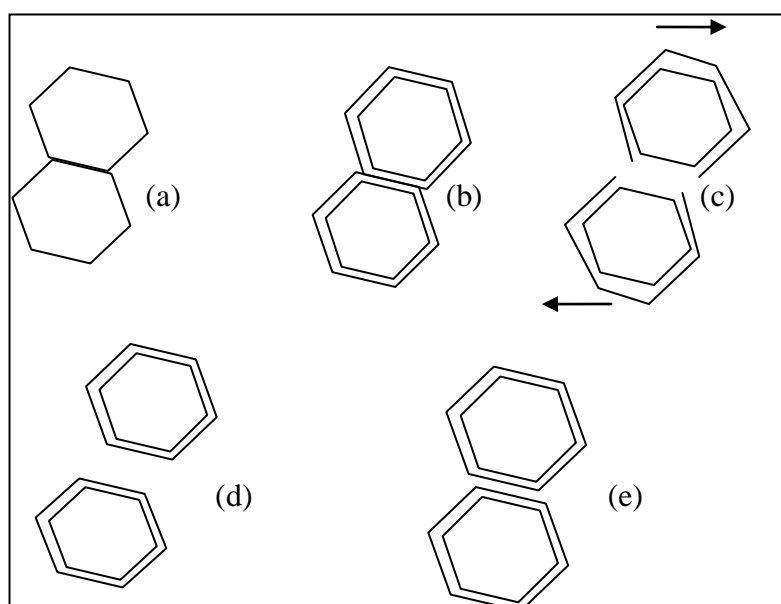


Figura 2.5. Modelo para a destruição estrutural irreversível induzida por ação de corte; (a) Partículas de cimento em contacto; (b) Formação de membrana envolvente quando o cimento contacta com água; (c) As pontes das membranas rompem-se sob a ação de corte; (d) Reconstrução das membranas; (e) Em repouso, as membranas aproximam-se para uma distância correspondente ao mínimo de energia repulsiva [Banfill 2003].

2.3. Métodos de caracterização reológica

Tradicionalmente, o método do espalhamento é a técnica mais usada para caracterizar as argamassas em termos de trabalhabilidade, pois é um processo muito simples, rápido e de fácil instalação no local. Um tronco de cone, aberto em ambas as extremidades é preenchido com o material e colocado sobre uma mesa de espalhamento. Sendo a tensão o peso do material por unidade de área, quando se retira o cone apenas se verifica espalhamento se a tensão de cedência for excedida. Deste modo, pode-se concluir que o primeiro valor de espalhamento medido pode ser relacionado com a tensão de cedência. A segunda medida de espalhamento é efetuada após um número determinado de batidas na mesa, estando este valor também relacionado com a viscosidade pois, se existir escoamento, a tensão aplicada excedeu a tensão de cedência. Uma vez que não permite uma medida discriminada destes dois parâmetros reológicos torna complicado um tratamento analítico do comportamento reológico. Pode, no entanto ser um auxiliar precioso de caracterização reométrica, ao permitir conhecer o estado de consistência da argamassa e se esta se encontra ou não dentro da zona de trabalhabilidade [Banfill 2003].

Aparentemente, para caracterizar uma argamassa através dos dois parâmetros fundamentais, um reómetro de cilindros coaxiais seria o ideal, pois as equações de fluxo podem ser expressas com precisão [Banfill 1987]. No entanto, existem regras bem estabelecidas para as dimensões dos aparelhos de medição que limitam a sua utilização. Em primeiro lugar, o tamanho do espaço entre o cilindro interior e exterior deve ser, no mínimo, dez vezes o tamanho da maior partícula presente na argamassa, de forma a minimizar os efeitos de falta de homogeneidade no empacotamento das partículas junto às paredes dos cilindros. Em segundo lugar, a relação entre o raio do cilindro exterior e o raio do cilindro interior não pode ser maior que 1,2, de forma a assegurar que a variação na velocidade de corte do material, ao longo do intervalo entre cilindros, seja a menor possível. Por último, a relação entre a altura e o raio do cilindro não pode ser menor que 1 para minimizar a interferência do fundo. Estes fatores implicam que para se cumprirem estas regras, tendo em conta as dimensões das partículas dos agregados presentes numa argamassa (tipicamente até 5 mm), os aparelhos apresentariam dimensões tão grandes que os tornam impraticáveis. Estes princípios aplicados ao viscosímetro de cone e prato levam às mesmas conclusões, pois o espaço de separação (*gap*) é zero junto ao extremo do cone [Banfill 1981, Banfill 1995, Banfill 2003].

Tattersal e Banfill [Tattersal et al 1983] mostraram que é possível testar as misturas frescas de betão em misturadoras e obter a informação necessária para criar uma curva de fluxo, sendo para isso necessário que a misturadora tenha mais do que uma velocidade. Este foi denominado o método dos dois pontos. O reómetro Viskomat e o seu antecessor, Viscocorder, são instrumentos comerciais capazes de produzir curvas de fluxo de acordo com este princípio.

O Viskomat é um reómetro desenvolvido na Alemanha, que consiste num contentor cilíndrico onde se introduz a amostra de argamassa, sendo depois colocado num suporte com velocidade de rotação variável. Uma pá concêntrica é montada numa cabeça que mede o torque, pois à medida que o cilindro roda, a resistência viscosa da argamassa ao fluxo através das lâminas da pá dá origem a um torque.

Durante qualquer ensaio, em que a amostra é sujeita a um determinado programa de velocidade, monitoriza-se o torque eletronicamente de forma contínua. A curva de fluxo pode ser construída sob a forma de torque (T) em função da velocidade de rotação (N) e, no caso das argamassas, o seu comportamento é descrito pela equação $T = g + hN$, sendo g e h constantes características do material [Banfill 1990, Banfill 1994].

Banfill confirmou experimentalmente que g e h são diretamente proporcionais à tensão de cedência e à viscosidade plástica, respetivamente. Para tal, determinou as constantes de proporcionalidade (K e G) entre estas variáveis através de um processo de calibração do reómetro (Viskomat), utilizando líquidos de características reológicas conhecidas e seguindo um procedimento descrito nas referências citadas. Segundo este mesmo autor, para este tipo de reómetro tem-se $\tau_0 = (K/G)g$ e $\eta = (1/G)h$, sendo K igual a 10.1 e G igual a $1.29 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, o que permite a conversão de Nmm para Nm^{-2} no caso da tensão de cedência e de Nmms para Nm^{-2}s no caso da viscosidade. No entanto, é bastante comum, na literatura da especialidade, os autores discutirem as variações da tensão de cedência (τ_0) e da viscosidade (η) em termos da variação de g e h [Banfill 1990, Banfill 1993].

Relativamente aos procedimentos do teste reométrico, Banfill considerou que, devido à existência do fenómeno de destruição e reconstrução das partículas, o comportamento dos materiais cimentícios em termos da sua reologia é melhor estudado através de testes onde a velocidade de corte é mantida constante [Banfill 2003]. No entanto, Banfill e outros autores também utilizam outras rotinas de teste, nomeadamente, a

subida e descida em escada da velocidade de corte com o tempo, de forma a obter valores de equilíbrio de torque para o cálculo das propriedades de fluxo, a tensão de cedência e a viscosidade plástica. [Banfill 1991, Banfill 2003, Golaszewski 2004].

Relativamente ao betão, as suas propriedades reológicas são importantes porque condicionam a sua aplicação e acabamento e também têm repercussões sobre as propriedades em endurecido. [Bastos 1992, Tattersall 1976, Wierig 1990]. Infelizmente, devido à complexidade das suas composições, não existe nenhum método definitivo para prever o fluxo de cimento a partir de seus componentes. Mesmo medições dos parâmetros reológicos não são facilmente realizáveis devido à grande variedade de tamanhos de partícula encontrados no betão (desde a partícula de cimento com poucos micrómetros até aos agregados grossos que podem atingir as dezenas de milímetros, como no caso de betões para barragens) [Ferraris₂ 1999].

Na produção de betão, termos como trabalhabilidade, fluidez e coesão são utilizados, com o mesmo significado, para descrever o comportamento reológico dos betões, tornando estes termos bastante subjetivos [Ferraris₂ 1999]. Tattersall [Tattersall, 1976] considera que a trabalhabilidade é a capacidade que o betão apresenta para fluir para um molde ou cofragem, a facilidade de ser compactado para um volume mínimo. Outra abordagem foi efetuada por Kosmatka [Kosmatka et al 1994] que relaciona a reologia do betão com a trabalhabilidade, a consistência e a plasticidade. A trabalhabilidade é entendida como uma medida da facilidade com que o betão é colocado e acabado; a consistência seria a capacidade de fluência do betão recém-misturado e a plasticidade estaria relacionada com a facilidade de moldagem do betão. Também neste caso são definições subjetivas. Então, Tattersal [Tattersall, 1976] decide classificar a terminologia da trabalhabilidade do betão em três classes: (i) Classe I: qualitativa - trabalhabilidade, fluidez, compacidade, estabilidade, acabamento, bombagem e consistência, usando-os de uma forma descritiva, sem quantificar. (ii) Classe II: empírica quantitativa - espalhamento ou o fator de compactação, usando-os numa simples declaração quantitativa do comportamento de um determinado conjunto de circunstâncias. (iii) Classe III: quantitativa fundamental – viscosidade e tensão de cedência, usados de acordo com os glossários britânicos (Glossary of Standard Rheological Terms, British Standard Institution BS 5168:1975).

Como já foi anteriormente referido, o comportamento reológico de betões deve ser preferencialmente descrito através da sua viscosidade e tensão de cedência. No entanto, a maioria dos testes existentes mede apenas um parâmetro, relacionado com a viscosidade ou com a tensão de cedência [Ferraris₂ 1999]. Nos testes de medida de apenas um fator, a relação entre a medida e as características reológicas, nomeadamente, a viscosidade e a tensão de cedência, não é óbvia nem facilmente relacionável.

Os testes de um fator mais usados são o abaixamento do cone de Abrams ou o ensaio da mesa de espalhamento. No primeiro teste, um cone de metal truncado, aberto em ambas as extremidades é colocado sobre uma superfície horizontal, é preenchido com betão, retirando-se rapidamente o cone e a queda do betão é medida determinando-se o abaixamento do cone de Abrams (Figura 2.6). Este método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade. Neste ensaio, a tensão é composta pelo peso do betão por unidade de área. O betão irá cair ou mover apenas se a tensão de escoamento for excedida e irá parar quando a tensão induzida pelo peso do betão estiver abaixo do limite da tensão de cedência. Portanto, o teste de abaixamento é relacionado com o limite de elasticidade [Ferraris₃ et al 1998]. O segundo método de abaixamento consiste em colocar o cone de betão sobre uma mesa que pode ser elevada e deixada cair um determinado número de vezes. Neste caso é medido o espalhamento do material, determinando-se o perímetro de espalhamento. O resultado deste teste está relacionado com a viscosidade e não com a tensão de cedência porque durante a queda o betão é sujeito a uma tensão superior à tensão de cedência (DIN 1045: 1988, Concrete and Reinforced Concrete: Design and Construction, Deutsche Institut für Normung E.V., Berlin).

Outro tipo de teste usado é o de penetração, cujo princípio é medir a profundidade de penetração de um determinado objeto. Exemplos destes testes são o de Vicat, a bola de Kelly e o teste Wigmore. Estes testes consideram que a profundidade de penetração do objeto depende da tensão de cedência do betão. A massa ou a força (pré-estabelecidas) aplicada no objeto de penetração medem a tensão de cedência do betão. Estes testes também são utilizados para medir o tempo de presa e endurecimento dos betões. O teste K-Abaixamento foi transformado numa norma ASTM em 1997, Standard Test Method for Flow of Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete, ASTM C 136297, Vol. 04.02. No entanto, este teste é adequado apenas para betão cujo agregado grosso possua dimensões inferiores a 9,4 mm e com tensão de cedência bastante baixa.

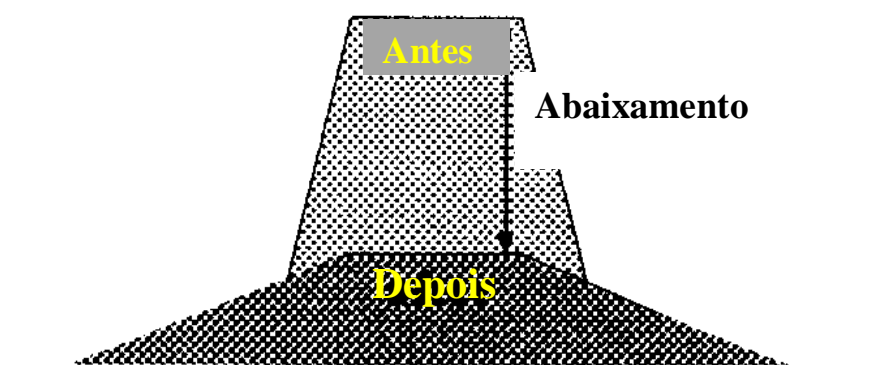


Figura 2.6. Esquema de um teste de abaixamento.

O aparelho LCL foi desenvolvido em França e determina o tempo que o betão demora a fluir para uma nova forma. O betão é vertido para um molde prismático dividido em duas partes por uma cunha. A cunha é retirada e é aplicada vibração ao molde. O operador pode mudar a amplitude, enquanto que o vibrador usado determina a frequência. O tempo para que o betão flua e ocupe todo o prisma é considerado uma medida da trabalhabilidade (Figura 2.7). A tensão de escoamento é provavelmente superada pela vibração, por conseguinte, a medida está relacionada com a viscosidade plástica do material. Se a amplitude da vibração é levantada lentamente até que o betão comece a fluir, um valor relacionado com a tensão de cedência pode ser obtido [De Larrard 1993].

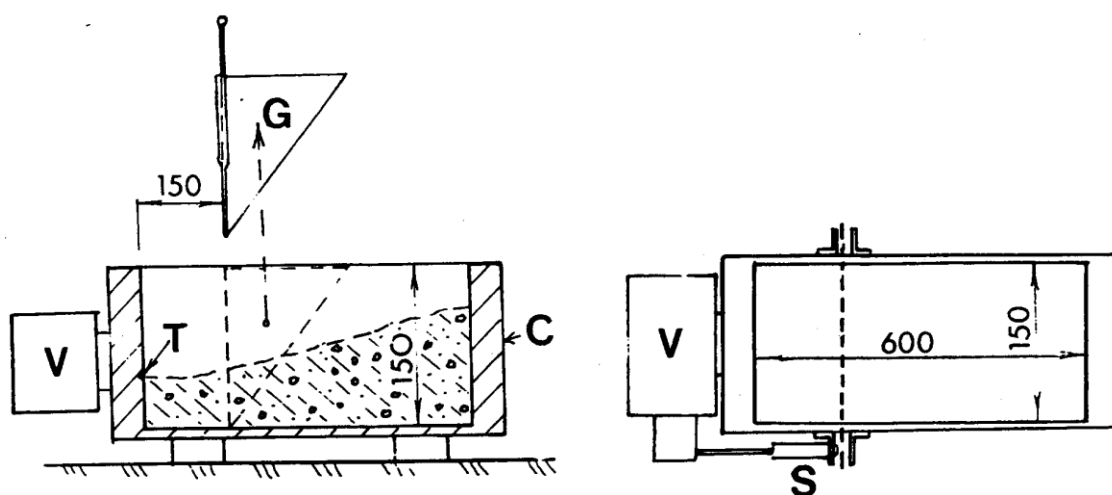


Figura 2.7. Esquema de um ensaio com o aparelho LCL.

No entanto, para definir corretamente o comportamento reológico do betão é necessário determinar a viscosidade plástica e a tensão de cedência. São necessários

ensaios que forneçam dois parâmetros. Entretanto, nos testes que fornecem dois parâmetros, os valores medidos por estes ensaios não permitem necessariamente o cálculo direto da viscosidade e da tensão de cedência.

O reômetro mais comum é o de cilindros coaxiais. Nesta geometria, tendo o betão agregados com um tamanho de 10 mm ou superior, forçaria o aparelho a ter tão grandes dimensões que o torna impraticável. O teste de dois pontos de Tattersal [G. H. Tattersall, 1976] é o primeiro e mais conhecido aparelho a medir propriedades de fluxo de betões. Consiste num recipiente onde o betão é colocado. Uma haste rotativa, com geometria específica, é introduzida na amostra de betão. A resistência que a haste sente, devida ao material, é medida, obtendo-se o valor do torque. Aumentando a velocidade obtém-se uma curva de torque em função da velocidade. Como o gráfico obtido é linear, extrapola-se até á velocidade zero, obtendo-se a tensão de cedência correspondente á ordenada na origem. A viscosidade está relacionada com a inclinação da curva. A Figura 2.8 mostra um esquema do reômetro de Tattersal.

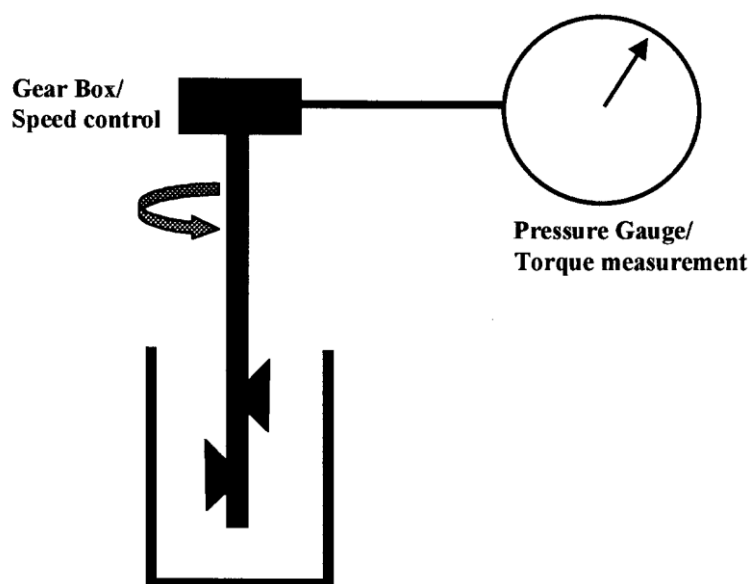


Figura 2.8. Esquema do reômetro de dois pontos de Tattersal [Ferraris₂ 1999].

A partir do primeiro reômetro criado por Tattersall, Wallevik e Gjrv [Wallevik et al 1988] e Beaupre [Beaupre 1994] melhoraram o reômetro através da automatização, com registo do torque e velocidade num computador. Em ambos os casos, o valor de torque medido versus a velocidade do rotor é gravado e resulta numa relação linear. A inclinação,

h , e a intercepção com a velocidade zero, g , estão relacionados com a viscosidade plástica e a tensão de cedência, respetivamente. Assumindo que a taxa de corte média é proporcional à velocidade do impulsor, Tattersall propôs a seguinte equação:

$$T = (G/K) \tau_0 + (G \eta)N \quad (2)$$

Onde T é o torque, G a constante obtida por calibração com fluidos Newtonianos, K a constante obtida por calibração com fluidos não Newtonianos, N é a velocidade, τ_0 é a tensão de cedência e η é a viscosidade. Então, $\tau_0 = g / (G/H)$ e $\eta = h/G$, onde g e h são dois valores mensuráveis. Infelizmente as constantes G e K são praticamente impossíveis de obter. Embora não seja possível determinar o valor das constantes G e K , os parâmetros g e h são proporcionais à tensão de cedência e à viscosidade plástica, respetivamente.

O aparelho Bertta [Leivo 1990] foi desenvolvido na Finlândia. Consiste em dois cilindros concêntricos (480 e 330mm de diâmetro) entre os quais o betão é colocado. O cilindro exterior roda de um modo oscilatório e, o torque induzido é medido. Este aparelho permite calcular realmente a viscosidade e a tensão de cedência em função da frequência aplicada. No entanto, a máxima dimensão de agregado não pode ser superior a 13mm e, a relação entre os raios dos cilindros é de 1,45, considerado demasiado alta, levantando a questão sobre a fiabilidade dos valores da viscosidade e tensão de cedência.

O reómetro BTRHEOM foi desenvolvido em França [De Larrard et al 1995]. É constituído por um recipiente com a parte inferior serrilhada e uma roda de rotação superior que repousa sobre o betão [Russell 1999]. A distribuição da tensão de corte permite o cálculo direto da viscosidade e tensão de cedência, considerando que o betão se comporta como um fluido Binghamiano. Os resultados confirmam que betão fluido se comporta de acordo com o modelo de Bingham. De Larrard et al [De Larrard₁ et al 1998] verificaram que, ao longo de uma ampla gama de tensões, o betão se comporta como uma suspensão granular grosseira, mais de acordo com a equação de Hershel-Buckley.

Modificações no ensaio de cone de Abrams [Ferraris 1998, De Larrard₂ et al 1998] foram efetuadas para permitir medição da viscosidade, pois o ensaio de abaixamento do betão está associado à tensão de cedência, tal como já foi mencionado. A modificação consiste em medir não só a extensão da queda, mas também a velocidade da queda. Entretanto, outros viscosímetros para betões foram desenvolvidos, tal como o BT2 Schleibinger, desenvolvido na Alemanha. Tal como o reómetro de dois pontos de Tattersal,

não fornece diretamente a viscosidade e tensão de cedência do betão mas sim parâmetros proporcionais a essas propriedades [Golaszewsky 2007, Greim 1997].

2.4. Efeito dos componentes de argamassas e betões sobre o seu comportamento reológico.

No estado fresco os materiais cimentícios caracterizam-se como suspensões muito concentradas cujo comportamento reológico é geralmente muito complexo, dependendo de diversos fatores de natureza diferente, tais como [A. Pappo 2004]:

- Fatores físicos (razão água/cimento, distribuição granulométrica e forma das partículas de cimento e agregados);
- Fatores mineralógicos e químicos (composição dos ligantes);
- Condições de mistura (tipo de misturadora, taxa e tempo de mistura);
- Presença de adjuvantes.

Contudo, o estudo da influência destes parâmetros na reologia das argamassas não tem sido muito extenso, uma vez que a atenção principal foi direcionada para o efeito sobre as características do produto endurecido.

Banfill é um dos autores que tem efetuado um estudo sistemático sobre a reologia de materiais cimentícios. Nestes trabalhos pode-se encontrar o efeito de componentes como a água de amassadura, os agregados (areia) e alguns adjuvantes sobre o comportamento reológico da argamassa [Banfill 1991; Banfill 1994; Banfill 1998]. O aumento da água de amassadura apresenta um efeito evidente sobre os parâmetros reológicos, na forma de uma diminuição acentuada da viscosidade e tensão de cedência. Em relação aos agregados, o principal parâmetro estudado foi a granulometria da areia utilizada nas argamassas. Neste caso, o aumento da fração granulométrica mais fina tem como consequência um aumento da tensão de cedência e da viscosidade, para o mesmo teor de água [Banfill 1991; Banfill 1994; Banfill 1998].

Mahaut [Mahaut et al 2008] optou por estudar o efeito do volume de agregado grosso sobre a tensão de cedência dos materiais cimentícios, verificando um aumento da tensão de cedência com o aumento da fração de agregado grosso. Outros autores [Westerholm et al 2008] analisaram o efeito das características dos agregados e determinaram que as propriedades reológicas e a quantidade de água necessária estão

fortemente dependentes da quantidade de material fino que se encontra num agregado britado. O valor elevado da tensão de cedência observado em argamassas com agregado britado é basicamente consequência do elevado teor de finos que se encontra em agregados britados que também contribuem para um aumento da viscosidade plástica, devido ao aumento da fricção entre as partículas que advêm muito da forma das partículas [Westerholm et al 2008]. Hu and Wang [Hu et al 2011] ao estudarem o efeito dos agregados grossos sobre a reologia do betão concluíram que a viscosidade e a tensão de cedência aumentam com o aumento do teor em areia nas argamassas e, independentemente da composição da argamassa do betão, a viscosidade e a tensão de cedência do betão aumenta com o aumento da quantidade de agregado grosso. Também determinaram que comparando com agregado de um só tamanho, um agregado com distribuição de tamanhos bem graduada reduz a viscosidade e a tensão de cedência.

Relativamente aos ligantes, Bentz [Bentz et al 2012], constatou que tanto a viscosidade como a tensão de cedência estão fortemente dependentes das características das partículas dos pós (cimento e pozolanas) usados na preparação da mistura de pastas de cimento com cinzas volantes, mantendo constante o teor de água de amassadura. Bentz demonstrou que o número de partículas (densidade) e a área superficial de partículas são parâmetros que influenciam de forma crítica a reologia das pastas.

A viscosidade é influenciada pelas partículas de cimento e de cinzas volantes, apresentando uma relação aproximadamente linear entre os valores da viscosidade plástica e a área superficial total ou entre os valores da viscosidade e o número total de partículas (densidade da mistura), tal como pode ser observado nas Figura 2.9 e 2.10. A tensão de cedência é dominada pela densidade de partículas da componente cimento, de acordo com Bentz [Bentz et al 2012], que afirma que neste caso as cinzas volantes têm um efeito de diluição sobre a ação das partículas de cimento na tensão de cedência.

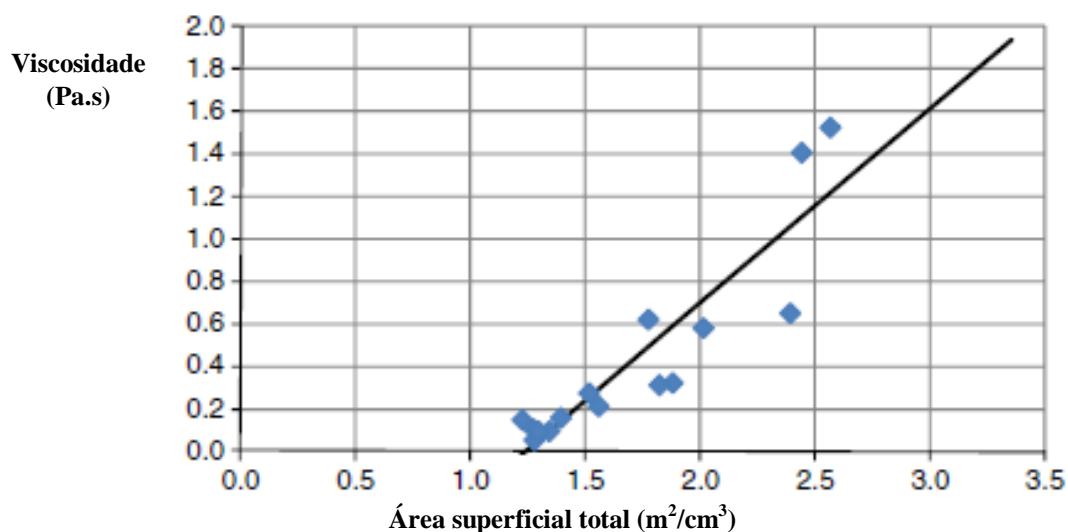


Figura 2.9. Valores da viscosidade plástica em função da área superficial total das partículas de cimento e pozzolana [Bentz et al 2012].

Fragoulis [Fragoulis et al 2005] estudou diatomites gregas em diferentes percentagens de substituição do cimento, usando diferentes teores de água de amassadura para manter uma mesma consistência. Verificou que a adição de diatomite ao cimento resulta num aumento drástico da área superficial sendo necessário um aumento acentuado da água necessária para obter a mesma trabalhabilidade.

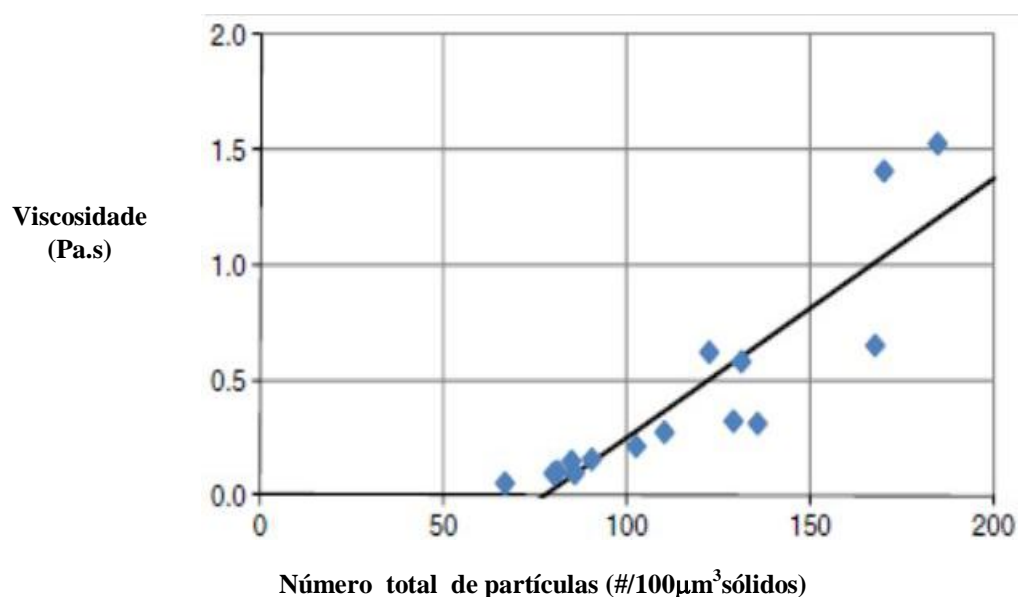


Figura 2.10. Valores da viscosidade plástica em função do nº total de partículas [Bentz et al 2012].

A reologia de argamassas ou betões com pozolanas não tem sido muito estudada. No entanto, é amplamente aceite que devido à finura dos materiais pozolânicos, com elevada área superficial por partícula, a sua presença espessa as misturas sendo necessário aumentar substancialmente a quantidade de água de amassadura. Um estudo de 2008 [Aminul 2008], utilizando um reómetro para betões, analisa o comportamento reológico de betões, de alta resistência, com adições pozolânicas, sendo uma delas a cinza de casca de arroz (CCA) com substituições de 5, 10, 15 e 20%. Verificou-se que a tensão de cedência do betão diminui com o aumento do teor em CCA, comportamento que não seria de esperar pois as partículas de CCA são alongadas e irregulares. A viscosidade plástica mostrou um aumento drástico com a presença deste material pozolânico. Este estudo justificou estes resultados pelo facto das partículas de CCA com elevada finura preencherem os espaços entre as partículas maiores de cimento, diminuindo as forças de fricção e aumentando a compactação, levando a uma diminuição da tensão superficial. Relativamente ao facto de aumentarem a viscosidade plástica, foi sugerido que a forma e finura das CCA terão um efeito crítico na reologia, pois quanto maior a finura dos materiais, maior o número de contactos entre as partículas, aumentando, desta forma, a resistência ao fluxo. Outros estudos confirmam a necessidade de uma maior quantidade de água para que se obtenha a mesma consistência e o aumento da resistência à compressão com a presença de diatomite, pelo menos até 10% de substituição [Stamatakis et al 2003; Kastis et al 2006; Yilmaz and Ediz 2008].

Relativamente aos agentes plastificantes, a sua ação principal é a redução da viscosidade e da tensão de cedência, permitindo uma redução da quantidade de água de amassadura sem alterar a trabalhabilidade [Banfill 1994, Struble 1995, Sebok 1999; Ferraris, et al 2001, Golaszewski 2004]. O mecanismo principal responsável pelo aumento de fluidez está relacionado com a dispersão de partículas de cimento devido à adsorção de moléculas deste adjuvante na sua superfície [Ferraris et al 2001, Chandra et al 2002, Papo 2004]. Alguns autores verificaram ainda que, para além do aumento do teor de plastificante, também o atraso no tempo de adição deste adjuvante era responsável por uma diminuição daqueles parâmetros reológicos bem como pelo atraso no tempo de presa. Foi realçado que alguns agentes plastificantes podem apresentar, para concentrações elevadas, um comportamento dilatante sob ação de corte, devido ao desenvolvimento de cadeias

poliméricas longas (caso dos poliacrilatos) que provocam uma agregação das partículas [Aiad 2003, Papo 2004].

Também em estudos sobre o efeito de materiais pozolânicos sobre as características das argamassas e dos betões se pode verificar que os autores utilizam plastificantes ou superplastificantes de forma a controlar a quantidade de água de amassadura e consequentemente a trabalhabilidade dos sistemas [Sensale 2006]. Especificamente, um estudo [Galias et al 2000] sobre o efeito da utilização de materiais muito finos, tal como as pozolanas, sobre a quantidade de água de amassadura de pastas de cimento concluiu que o aumento da quantidade de água quando se usa materiais muito finos é o fator principal para a utilização de superplastificantes. A área superficial das partículas é o parâmetro mais importante para a avaliação da quantidade de água, mas características como a forma e textura devem ser levadas em conta, pois formas irregulares requerem duas a quatro vezes maiores quantidades de água. O aumento da largura da distribuição de tamanhos dos aditivos pode ser uma forma de aumentar a densidade de empacotamento e otimizar a quantidade de água. Este estudo ainda vai mais longe e conclui que sem a utilização de superplastificante, os materiais finos não contribui para um empacotamento compacto na matriz de cimento.

Artelt e Garcia [Artelt et al. 2008], estudaram o efeito da adição de superplastificante e partículas ultra finas (sílica fumo) sobre o comportamento reológico de argamassas com baixo teor em água de amassadura. Concluíram que o aumento da concentração do agente redutor de água de amassadura é uma forma eficaz para melhorar a trabalhabilidade. Concentrações mais elevadas de superplastificante aumenta a taxa de adsorção na superfície das partículas, aumentando as interações repulsivas entre elas separando-as e, desta forma, libertando água. Barrak [Barrak et al 2009] estudou a influência dos componentes de betão autocompactável sobre as propriedades de fluxo. Concluiu que o agente redutor de água de amassadura é o componente principal no que se refere à capacidade de espalhamento do betão devido a um abaixamento da tensão de cedência. Kismi [Kismi et al 2012] considera que a trabalhabilidade é uma das propriedades fundamentais dos materiais cimentícios. O seu controle garante uma correta e fácil aplicação do material, sem segregação dos agregados. A trabalhabilidade de sistemas de cimento depende da sua reologia e a presença do superplastificante é fundamental em composições com baixos teores de água. Emoto [Emoto et al 2007] investigou a influência

das matérias-primas em propriedades como a trabalhabilidade, a cinética de hidratação e a reologia em betão auto - nivelante. Verificou-se que o comportamento em fluxo do material é influenciado principalmente pelo tipo de plastificante e que a presença do plastificante atua como retardador da hidratação. Este efeito pode ser estudado através da análise reológica e através de medidas de hidratação.

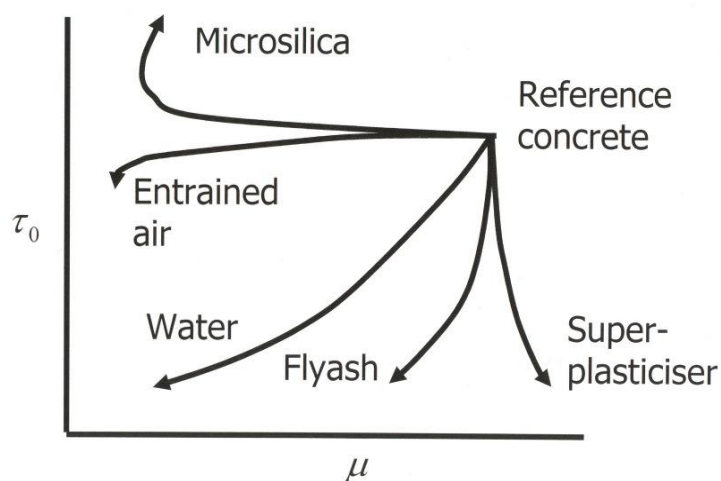


Figura 2.11. Efeito de componentes sobre os parâmetros reológicos. A mudança de direção causada pelo aumento do teor do componente é mostrada pelas setas [Banfill 2006].

Banfill [Banfill P.G. 2006] resume os efeitos de alguns componentes sobre as propriedades reológicas, especificamente sobre a sua viscosidade (μ) e a sua tensão de cedência (τ_0), numa representação esquemática na Figura 2.11.

Partindo de um betão de referência, consegue-se observar o efeito de diversos componentes sobre o comportamento reológico do betão, nomeadamente o aumento do teor em água, em cinzas volantes e em superplastificante diminui a tensão de cedência e a viscosidade plástica com exceção do superplastificante que parece não atuar sobre a viscosidade até uma determinada quantidade limite, a partir da qual aumenta a viscosidade. A microsilica e o agente introdutor de ar diminuem a viscosidade mas enquanto a microsilica, acima de um determinado teor aumenta a tensão de cedência, o agente introdutor de ar baixa a tensão de cedência quando a sua quantidade atinge um valor limite. partir de uma representação esquemática, deste tipo, definida para um betão e os seus componentes é possível modelar as suas formulações a partir da análise reométrica.

Golaszewsky [Golaszewsky 2007] considera que as argamassas e betões são uma mistura de cimento, agregados e água com ou sem aditivos ou adjuvantes e a diferença entre as argamassas e betões se encontra apenas no limite de tamanho de agregado. Segundo este autor, sob um ponto de vista físico, não existe diferença na estrutura dos dois materiais e os fenómenos que ocorrem no seu interior são de natureza similar. No seu estudo conclui que os parâmetros reológicos das misturas de betão estão diretamente correlacionados com os parâmetros reológicos das argamassas e com o volume de argamassa no betão. Este autor verificou que tanto as argamassas como os betões apresentam a mesma tendência no seu comportamento em fresco com a variação dos teores de componentes como a água, o cimento, a areia, o superplastificante e as cinzas volantes, entre outros.

Num outro trabalho, Golaszewsky [Golaszewsky 2008] estudou a influência do volume de argamassa sobre as propriedades reológicas do betão. Mostrou que um aumento no volume de argamassa conduz a uma diminuição do valor de g e de h , parâmetros proporcionais à tensão de cedência e à viscosidade plástica respetivamente. O valor de g das misturas de betão aumenta ao longo do tempo. A taxa de diminuição de g aumenta com a diminuição do volume de argamassa no betão, da razão água/cimento e do teor em superplastificante. A natureza das alterações no parâmetro h no betão fresco ao longo do tempo depende do volume de argamassa no betão e da razão água/cimento. Quando o volume de argamassa no betão e a razão água/cimento são elevadas, a viscosidade plástica (h) aumenta ao longo do tempo. Quando se reduz o volume de argamassa no betão e a razão água/cimento, h mostra uma tendência para diminuir ao longo do tempo. Com o aumento do teor em superplastificante verifica-se uma diminuição dos parâmetros reológicos ao longo do tempo. Desta forma, de acordo com Golaszewsky [Golaszewsky 2008], os resultados da análise reológica obtidos para as argamassas podem ser utilizados para prever as mudanças no comportamento reológico do betão fresco ao longo do tempo. Este facto possibilita projetar, otimizar, controlar e corrigir a trabalhabilidade do betão fresco, com base nos valores dos parâmetros reológicos obtidos na análise reológica da argamassa.

Finalmente, a mistura das argamassas e betões também tem influência sobre a reologia desses materiais. A velocidade de corte durante a mistura é uma das variáveis mais importantes que afetam as propriedades reológicas do cimento Portland no estado fresco [Helmuth 1980]. Tem sido sugerido que uma elevada velocidade de corte na mistura

quebra os aglomerados do pó de cimento, antes da adição da água na pasta de cimento, muito dos quais são formados antes da adição de água para a pasta de cimento. Tattersall e Banfill desenvolveram esta ideia em termos do que denominaram como "destruição estrutural irreversível" [Tattersall et al 1983]. De acordo com estes autores os aglomerados de partículas compartilham uma única membrana hidratada. Quando se aplica uma tensão, verifica-se uma quebra total ou parcial dos aglomerados e novas membranas formam-se em torno das partículas dispersas e/ou dos aglomerados menores, inibindo assim aglomeração inicial. A existência dessa membrana é confirmada por microscopia eletrónica de varrimento [Sujata et al 1992, Yang et al 1995]. Estudos reológicos detalhados demonstraram que a presença dos aglomerados diminuía a fluidez das misturas [Yang et al 1995]. Aumentando a velocidade de mistura, foi demonstrado que se verificava uma diminuição da viscosidade plástica [Orban et al 1986] e da área de histerese das curvas de fluxo [Asaga et al 1980], nas pastas de cimento. Estudos realizados em pastas a velocidades de corte constantes indicam que a estrutura da rede aglomerada pode ser quebrada quando a velocidade de corte é aumentada. No entanto, para altas taxas de tensão de corte os produtos de hidratação são libertados para a fase aquosa e as propriedades de fluxo diminuem [Helmuth 1980].

Relativamente ao betão, o facto de a pasta de cimento ser misturada pela ação de moagem dos agregados grossos é muito importante para a mistura final. A massa de agregado em rotação na misturadora, homogeneiza a pasta de forma tão eficaz como a mais vigorosa misturadora de laboratório [Powers 1968].

Confirmando os resultados anteriores, Williams et al [Williams et al 1999] desenvolveu uma técnica para avaliar o efeito da mistura na reologia das pastas de cimento. O estudo foi efetuado através da medição da destruição estrutural do cimento fresco usando, para isso, a avaliação da área dos ciclos de histerese e a viscosidade plástica. A reometria foi usada como método para comparar a eficácia de várias técnicas de mistura. Uma tensão de corte elevada resultou em melhores propriedades de fluxo (Figura 2.12).

De acordo com Collin e Jézéquel [Collin et al 2009], a qualidade da mistura pode ser dividida em dois fenómenos principais: a dispersão e a distribuição. A dispersão está relacionada com a separação das partículas de aglomerados, geralmente formados nos primeiros momentos de contacto com a água devido a forças de capilaridade. A

distribuição está relacionada diretamente com a homogeneidade do produto final, correspondendo à capacidade da misturadora para espalhar as partículas no interior do produto.

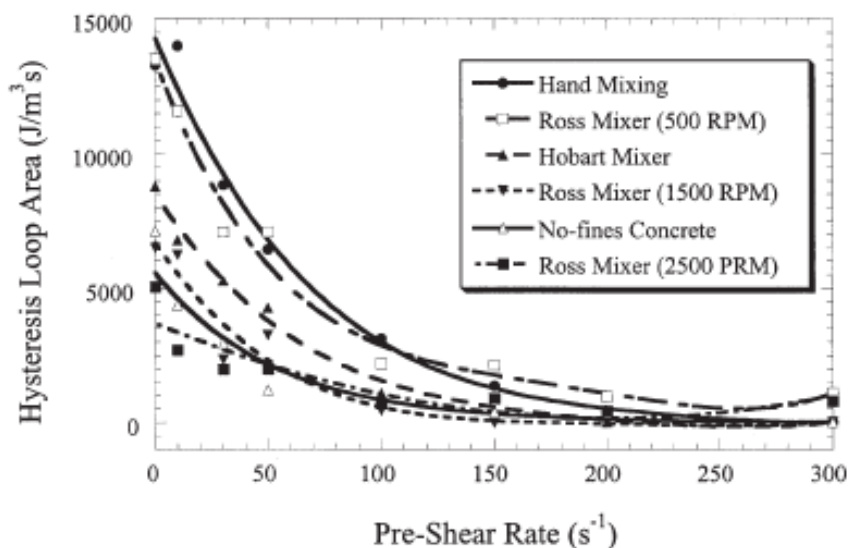


Figura 2.12. Área de histerese em função de várias técnicas de mistura [Williams et al 1999].

Este estudo foi baseado na análise da evolução da cor de partículas de pigmento vermelho durante a mistura. Um único tempo de mistura é suficiente para caracterizar a eficiência em termos de distribuição. Regras simples para a produção de lotes idênticos sob diferentes condições de operação podem ser determinadas. Como exemplo, para a utilização de diferentes velocidades de mistura com o mesmo misturador seria apenas necessário um ajuste proporcional do tempo de mistura. No entanto, a eficiência global da mistura vem de ambas as ações de dispersão e distribuição, de modo que nenhum destes subprocessos devem ser considerados isoladamente. Complementando o estudo anterior, Jézéquel [Jézéquel et al 2007] analisou os aspectos dispersivos das misturas. A eficiência da operação de mistura é determinada pela homogeneidade do betão produzido. Partículas aglomeradas de cor vermelha foram adicionadas ao material antes da mistura. As partículas foram gradualmente desaglomeradas por efeito das solicitações impostas ao material. Durante a agitação, efetuaram-se medidas da intensidade da cor vermelha ao longo do tempo, fornecendo indicação sobre a dispersão que podem ser comparadas com diferentes misturas ou outros dispositivos de mistura.

2.5. Relação entre propriedades em fresco e em endurecido de argamassas e betões.

O estudo da reologia de argamassas e betões tem sido referido como relevante para o desenvolvimento de novos produtos e para a compreensão dos fenómenos responsáveis pelo seu comportamento, pois as propriedades finais do produto no estado endurecido são dependentes das características do produto no estado fresco. A utilização e adequação de novos componentes na formulação de argamassas e betões, nomeadamente, de adjuvantes e materiais pozolânicos tornam indispensável a avaliação do seu efeito sobre os parâmetros reológicos e a sua relação com as propriedades resultantes no estado endurecido.

De acordo com Banfill [Banfill 2011], o betão fresco deve capaz de ser transportado e colocado, de fluir facilmente para os moldes e em torno das armaduras, de compactar e ser acabado sem que se verifique segregação. O aumento do teor de água torna o betão mais fluido mas cria poros que enfraquecem o produto endurecido. A utilização de agentes redutores de água de amassadura permite manter o teor de água baixo e promover um aumento da resistência mecânica e da durabilidade do betão. Mantendo o teor de água baixo, reduz-se a absorção e a permeabilidade, impedindo a penetração de agentes agressivos para o aço das armaduras. Todos estes exemplos mostram que existe uma correlação entre as propriedades do betão em fresco e as propriedades do produto final. Também em ambos os estudos de Collin e Jézéquel [Collin et al 2009, Jézéquel et al 2007], os autores consideram que as propriedades finais das argamassas e betões são fortemente afetadas pela qualidade da mistura.

Um artigo publicado por Kovler [Kovler et al 2011], apresenta uma revisão bibliográfica relacionada com as propriedades no estado fresco e endurecido de betões. De acordo com este artigo pode-se esperar que apareçam ferramentas computacionais que permitam a previsão do efeito da formulação de mistura sobre as propriedades endurecidas. Estas ferramentas deverão permitir a previsão das propriedades no estado endurecido do betão e melhorar a previsão do seu comportamento estrutural. Kovler prevê que a viscosidade do betão se torne uma das propriedades mais importantes nesta correlação. As formulações das novas misturas de betão mostram tendência para uma redução do teor de cimento devido a razões ambientais. Para que as propriedades se mantenham semelhantes, em termos de durabilidade e resistência mecânica, a quantidade de água no sistema deverá

ser reduzida. Deste modo, a viscosidade deve aumentar devido ao aumento do teor de sólidos. Os contatos entre as partículas devem desempenhar um papel de importância crescente. Embora o ajuste do valor da tensão de cedência possa ser efetuado usando um superplastificante, o autor considera que o conhecimento sobre a forma de reduzir a viscosidade está muito menos desenvolvido. O incremento da viscosidade devido ao aumento do teor em sólidos poderá ser aumentado por outros fatores como o uso de agregados de menor qualidade, pois os recursos naturais de agregados estão a diminuir. Cada vez mais agregados britados ou mesmo reciclados estão a ser utilizados. A forma destes agregados e a sua baixa capacidade de empacotamento deverá aumentar fortemente a viscosidade.

Por outro lado, também por razões ambientais, novos ligantes serão desenvolvidos no futuro devendo gerar novas necessidades de conhecimento. Por exemplo, as interações das partículas de argila em sistemas geopoliméricos não tem nada em comum com as partículas de cimento.

Kovler [Kovler et al 2011] afirma que um certo número de trabalhos que abordam as propriedades específicas de betão fresco e endurecido têm sido publicados recentemente, com o objetivo de desenvolver novos métodos de ensaio, de interpretar os resultados, de modelar para prevêr o desenvolvimento de propriedades no tempo ou as suas alterações em termos de resistência mecânica ou ambiental. Em vários estudos, houve uma tentativa de encontrar uma correlação entre as propriedades do betão fresco e endurecido e a durabilidade foi realizada e, às vezes, tais correlações funcionam bem. Por exemplo, Chidiac [Chidiac et al. 2003], num estudo experimental efetuado, examinou o efeito da mistura e da consolidação na qualidade de um betão de elevada razão água/cimento. Medidas de resistência mecânica e de tensão de aderência foram usadas para avaliar a qualidade do betão endurecido. Os resultados mostraram que as propriedades reológicas do betão fresco podiam ser correlacionadas com propriedades no estado endurecido como a permeabilidade e a resistência mecânica.

Contudo, são poucos os estudos encontrados que correlacionam as propriedades de argamassas e betões nestes dois estados (fresco e endurecido) pelo que este trabalho tenta dar mais um contributo neste sentido.

3.METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

O trabalho efetuado visou, por um lado, o estudo e otimização de um método de caracterização do comportamento reológico de argamassas e betões, mediante o uso de reómetros específicos. Por outro lado, utilizando como base de estudo a argamassa base de um betão efetuou-se um estudo do efeito da presença de materiais pozolânicos, da variação da água de amassadura e da utilização de um adjuvante, nomeadamente um agente redutor de água de amassadura, normalmente designado como superplastificante, sobre o comportamento reológico da argamassa. Os resultados obtidos na análise reológica das argamassas são transpostos para a produção de betão que é sujeito a estudo reológico através do reómetro de betão e do cone de Abrams. Os materiais pozolânicos em análise foram um metacaulino e uma diatomite. Procurou-se estabelecer uma correlação entre o comportamento das argamassas e do betão no estado fresco mas também com o seu comportamento no estado endurecido. Por outro lado, como as formulações apresentavam materiais pozolânicos como substituição parcial do cimento, este trabalho procurou estudar qual a melhor forma de rentabilizar a eficácia da utilização destes materiais.

Este capítulo descreve a metodologia utilizada ao longo do trabalho. Em primeiro lugar, apresentam-se os materiais utilizados, a sua caracterização, e as formulações padrão para o betão e para a argamassa enunciando-se, seguidamente, o processo de preparação das amostras a serem analisadas pelas diferentes técnicas experimentais de caracterização. Por último, descrevem-se os métodos experimentais de caracterização dos betões e argamassas no estado fresco e endurecido.

3.2. Caracterização dos Materiais

3.2.1. Agregados

Os agregados utilizados foram uma brita calcária (B2), de dimensões ente 8 e 12 mm, uma brita mais fina, conhecida como bago de arroz (B1), e uma areia siliciosa (A) (Figura 3.1). Foram caracterizados em termos das suas massas volúmicas aparentes e reais

(norma NPEN1097-6-2000) e determinada a percentagem de absorção de água das britas (NPEN 1097-6-2000); a sua distribuição granulométrica foi determinada, a seco, através da utilização de peneiros de acordo com a norma NPEN 933-1-2000 (Tabelas 3.1 e 3.2).



Figura 3.1. Agregados: Areia (A), brita bago de arroz (B1) e brita 8-12mm (B2).

Tabela 3.1. Massas volúmica real e aparente dos agregados utilizados.

	Areia A	Brita B1	Brita B2
Massa volúmica real (g/cm ³)	2,60	2,62	2,62
Massa volúmica aparente (g/cm ³)	1,45	1,27	1,27
Absorção de água (%)	0	1,70	2,67

Tabela 3.2. Distribuição granulométrica dos diferentes agregados utilizados.

Abertura (mm)	Areia A	B1	B2
	% passado	% passado	% passado
31,5	100	100,0	100
16	100	100,0	100
8	100	100,0	37
4	100	100,0	1
2	100	59,9	0
1	98,81	12,2	0
0,500	98,79	4,9	0
0,250	82,89	3,8	0
0,125	19,37	3,3	0
0,063	1,33	0,9	0

3.2.2. Cimento

Como ligante foi utilizado um cimento Portland CEM I 42.5R, sendo este o componente com maior impacto na formulação de betões, pois tem elevados custos energéticos na sua fabricação. É comum a utilização de materiais pozolânicos nas formulações de betões e argamassas para eliminar alguns problemas de durabilidade causados, por exemplo, por reações indesejáveis como as álcalis-sílica ou sulfáticas [Rodríguez-Camacho et al 2002, Tsuneki 2009, Torgal et al 2008].

Dentro deste enquadramento decidiu-se assim caracterizar os aditivos pozolânicos que permitem a redução do teor em cimento sem, no entanto, colocar em causa as características finais das argamassas e betões.

A Tabela 3.3 apresenta a composição química do cimento obtida por espectroscopia de fluorescência de raios-X (Panalytical, modelo Axicos, com ampola de Rh).

Tabela 3.3. Análise por fluorescência de raios-X para o cimento.

C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.R.
(%)	22,23	5,70	3,50	0,09	1,13	63,30	n.d.	0,86	0,28	0,10	3,13

(n.d. – não determinado)

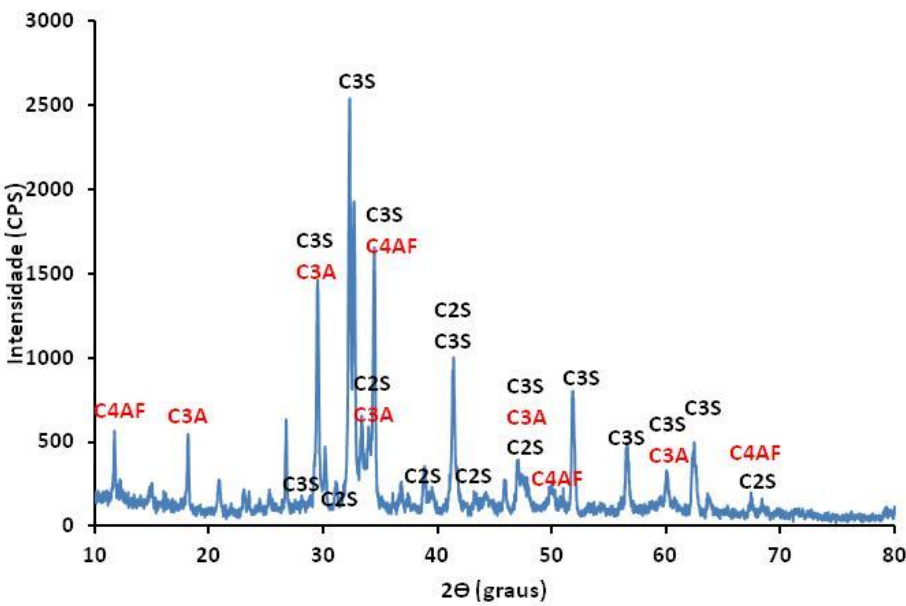


Figura 3.2. Difração de raios-X ao cimento.

Este material foi caracterizado também através de análise por difração de raios-X (Rigaku, modelo Geigerflex), estando patente na Figura 3.2 o seu padrão de difração. O cimento mostra como elementos majoritários o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato bicálcico (C_2S). Como elementos minoritários mostra o aluminato tricálcico (C_3A) e o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). Os restantes picos de DRX dizem respeito aos compostos anidros e gesso presentes na composição do cimento Portland usado (tipo I).

A Tabela 3.4 mostra algumas propriedades físicas do cimento, nomeadamente a sua massa volúmica real e aparente e a sua área superficial.

A determinação da massa volúmica real foi efetuada através da utilização de um picnómetro de hélio, marca Micromeritics, modelo Accupyc 1330. A massa volúmica aparente foi obtida através da determinação da massa do cimento para um determinado volume.

A determinação da área superficial das partículas foi feita usando um método de adsorção de gás também conhecido como BET (Brunauer, Emmet e Teller) num aparelho da marca Micromeritics, modelo Gemini 2380 [Allen 1997].

Tabela 3.4. Análise da área superficial e massas volúmicas, real e aparente do cimento.

	Área superficial (m²/g)	Massa volúmica real (g/cm³)	Massa volúmica aparente (g/cm³)
Cimento	0,353	3,06	0,90

3.2.3. Materiais pozolânicos.

3.2.3.1. Caracterização química e mineralógica

Os materiais pozolânicos utilizados foram um metacaulino e uma diatomite. A Tabela 3.5 apresenta a composição química do metacaulino e da diatomite obtidos por espectroscopia de fluorescência de raios-X (Panatylical, modelo Axicos, com ampola de Rh). Enquanto para a diatomite, a sílica é o óxido maioritário, representando um teor superior a 80%, no metacaulino os óxidos maioritários são a sílica e a alumina.

Tabela 3.5. Análise por fluorescência de Raios-X para os materiais pozolânicos.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.R.
(%)											
MK	52,17	44,50	0,45	nd	nd	0,01	nd	0,15	1,42	0,12	1,42
D	81,71	0,56	0,31	0,01	0,14	7,29	nd	0,08	0,05	0,06	10,16

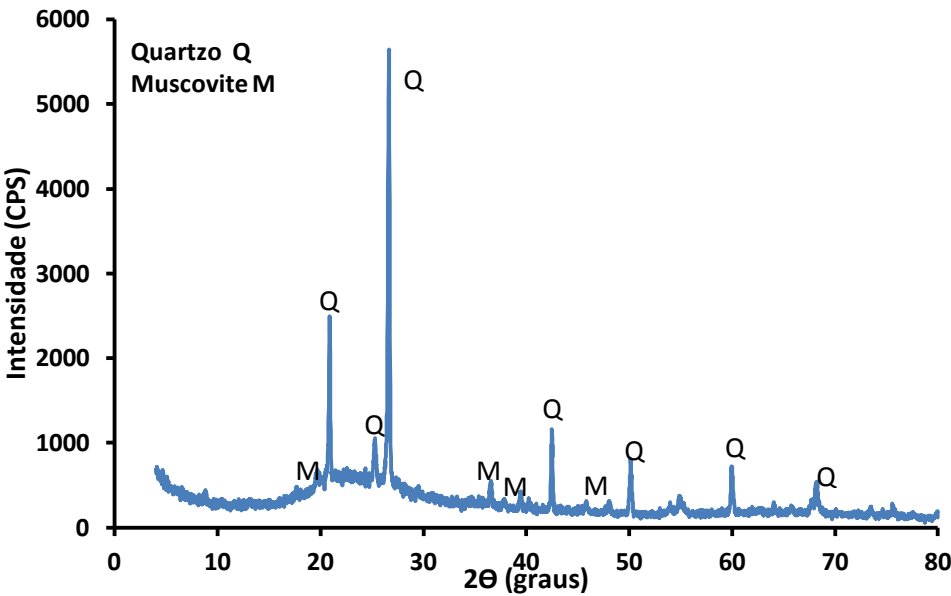


Figura 3.3. Difração de raios-X ao metacaulino.

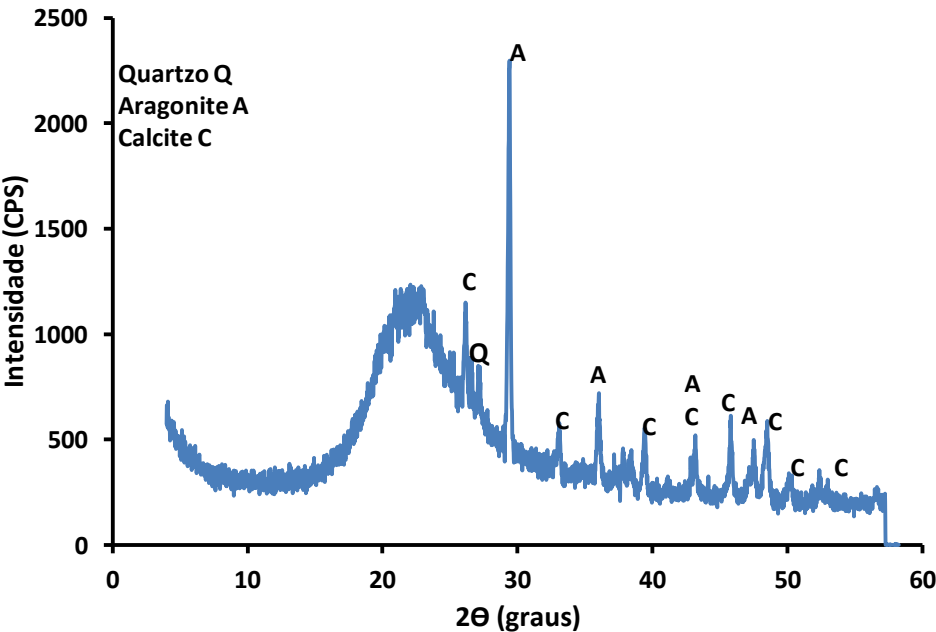


Figura 3.4. Difração de raios-X à diatomite.

Os materiais pozolânicos foram caracterizados também através de análise por difração de raios-X (DRX), (Rigaku, modelo Geigerflex), estando patente nas Figuras 3.3 e 3.4 os respectivos padrões de difração.

O padrão de difração do metacaulino é basicamente amorfo mas com presença de alguma sílica cristalina e um mineral argiloso, a moscovite, que é um aluminosilicato. Relativamente à análise de DRX da diatomite, ela é essencialmente amorfa mas com alguns picos de quartzo cristalino, aragonite e calcite.

3.2.3.2. Caracterização física

A caracterização física dos materiais foi efetuada tendo em conta as seguintes características, massa volúmica real e aparente, área superficial, distribuição granulométrica, absorção de água da diatomite e reatividade pozolanica comparativa.

A determinação da massa volúmica real foi efetuada através do método do picnómetro de hélio, marca Micromeritics, modelo Accupyc 1330.

A análise da sua área superficial foi feita usando o método de BET (marca Micromeritics, modelo Gemini 2380) [Allen 1997].

Os resultados dos ensaios anteriormente mencionados estão presentes na tabela 3.6.

Tabela 3.6. Análise da área superficial e massas volúmicas, real e aparente, do metacaulino e da diatomite.

	Área superficial (m²/g)	Massa volúmica real (g/cm³)	Massa volúmica Aparente (g/cm³)
MK	16,1860	2,4450	0,25
DT	8,9017	2,2445	0,49

A Figura 3.5 mostra a distribuição granulométrica dos materiais pozolânicos efetuada através do aparelho Coulter LS300) [Allen 1997].

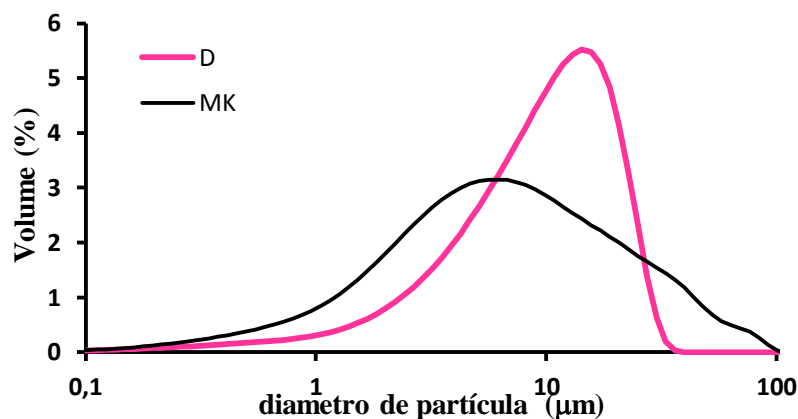


Figura 3.5. Distribuição de tamanho de partículas para o metacaulino e para a diatomite.

Bülent Yilmaz e Nezahat Ediz [Yilmaz B. et al 2008] mostraram, através de microscopia eletrônica de varrimento, que a diatomite é muito porosa e com área superficial não muito elevada, mesmo após calcinação e moagem. Considerou-se importante tentar determinar o valor de absorção de água da diatomite. Para tal, desenvolveu-se um método expedito em que se efetua uma diluição em água, de uma amostra de diatomite que depois se passa através de um filtro que retém partículas superiores a $8\mu\text{m}$. Quando toda a água livre passou através do filtro, raspa-se com uma espátula, o material com toda a porosidade preenchida e pesa-se (Figura 3.6). A diferença de massa entre o material molhado e o material seco relativamente ao material seco é considerada a percentagem de absorção de água da diatomite. A experiência foi repetida 10 vezes para duas quantidades de amostra diferentes, 1 g e 5 g. O valor de absorção de água médio apresentado pela diatomite é superior a 96%.



Figura 3.6. Procedimento para determinação do teor em absorção de água da diatomite.

3.2.3.3. Reatividade pozolânica

A reatividade pozolânica do metacaulino foi determinada usando o método de Chapelle modificado, de acordo com a norma NF P 18513, apresentando um valor de 1100 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de pozolana. Este método não foi realizado na diatomite porque o tempo de permanência desta em contacto com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) não é suficiente para se obter resultados fiáveis.

Não sendo possível determinar a reatividade pozolânica da diatomite através do método de Chapelle modificado, efetuou-se um estudo comparativo adaptado apenas para estas duas pozolanas. Este ensaio compara a resistência à compressão de argamassas de cal hidratada com metacaulino ou diatomite, baseada na reação das pozolanas com o hidróxido de cálcio. A escolha da cal como ligante deve-se à disponibilidade imediata do hidróxido de cálcio para reagir com as pozolanas. Este método consiste na produção de uma argamassa de cal de referência, cuja composição apresenta 80% da areia usada nas composições a estudar e 20% de cal aérea ou hidratada (grau de pureza 90% Ca(OH)_2). Nas argamassas com pozolanas substituiu-se 50% desta cal por diatomite ou metacaulino. Assim, para as argamassas com pozolanas, a formulação, em massa, foi de 80% de areia, 10% de cal e 10% de pozolana. O teor em água é adicionado de forma a se obter uma trabalhabilidade idêntica para as três composições. Para a argamassa de referência e para a argamassa com metacaulino adicionaram-se 22% de água, relativamente ao peso dos materiais sólidos, com 150 cm e 160 cm obtidos na mesa de espalhamento, respetivamente; para a argamassa com diatomite usaram-se 26% de água e obteve-se um espalhamento de 150cm. Foram produzidos 7 provetes de cada formulação. Após desmoldagem, quatro deles ficam acondicionados numa câmara à temperatura de 20°C e 65% HR; os outros três são imersos em água. A sua resistência mecânica à flexão e compressão foram determinadas às 24 horas, aos três, aos sete e aos vinte e oito dias. Por comparação é possível avaliar a reatividade pozolânica do metacaulino e da diatomite.

A Tabela 3.7 compara a resistência à compressão de uma argamassa de cal padrão com argamassas em que 50% da cal foi substituída por metacaulino ou por diatomite. Relativamente ao processo de cura em câmara condicionada com cerca de 20±5 °C e 65±5% HR, a argamassa de cal padrão e a argamassa com diatomite apenas puderam ser desmoldadas após três dias da moldagem enquanto a argamassa com metacaulino foi

desmoldada após 24 horas. Este facto deve-se à presença da alumina amorfa na composição do metacaulino. A alumina amorfa reage muito rapidamente com o hidróxido de cálcio e, consequentemente o material endurece muito mais rapidamente devido à produção de produtos cimentícios e à diminuição da água que é utilizada na reação. Desta forma o valor da resistência à compressão do metacaulino às 24 horas é de 0,29 MPa e aos três dias mostra um valor de 1,01 MPa, enquanto a desmoldagem da argamassa de cal e da argamassa com diatomite só foi possível ao terceiro dia. O metacaulino aos sete dias possui já um valor de resistência de 2,99 MPa e aos 28 dias de 3,79 MPa, entretanto a diatomite tem uma resistência de 0,62 MPa aos sete dias e de 1,08 MPa aos 28 dias. A argamassa padrão, para os mesmos tempos de cura, mostrou valores de resistência de 0,29 e 0,47 MPa, respetivamente. Consequentemente é bastante evidente a maior velocidade de reação do metacaulino durante os primeiros três dias de cura.

Quando argamassas com cal se encontram imersas em água a carbonatação pára, pois o dióxido de carbono (CO_2) não consegue difundir através dos capilares saturados [Van Balen 2005]. Deste modo, quando as amostras estão imersas em água apenas as reações pozolânicas são avaliadas. As amostras de metacaulino, imersas em água 24 horas após a sua produção, mostram ao terceiro dia um valor de resistência ligeiramente inferior ao obtido na cura ao ar. Este efeito talvez seja devido à paragem da carbonatação numa fase em que esta apresenta alguma velocidade. A carbonatação efetua-se de fora do provete para o seu interior, o dióxido de carbono inicialmente reage rapidamente com o hidróxido de cálcio na camada mais superficial das amostras; esta carbonatação vai fechando a porosidade das argamassas, tornando mais difícil a difusão do dióxido de carbono para o interior. O facto de as amostras imersas em água mostrarem maiores valores de resistência, com exceção da argamassas de cal padrão, deve-se ao facto de que estas reações necessitam de água para se realizar e, por outro lado, a paragem da carbonatação deixa uma maior quantidade de Ca(OH)_2 disponível para a reação com as pozolanas. Os resultados apresentados pelas amostras imersas em água, onde não existe carbonatação mas apenas reações pozolânicas, mostra claramente que o metacaulino tem uma maior reatividade pozolânica que a diatomite, pois o metacaulino consegue atingir 7,26 MPa, aos 28 dias, enquanto a diatomite consegue apenas 1,93MPa.

Tabela 3.7. Resultados para resistência à compressão apresentadas pelas composições de cal padrão e com substituição por metacaulino e diatomite, a idades e condições de cura diferentes.

Composições	Tipo de cura	Rc (MPa) 24 horas	Rc (MPa) 3 dias	Rc (MPa) 7 dias	Rc (MPa) 28 dias
Argamassa de cal padrão	20°C 65%HR	Não desmoldou	0,29	0,29	0,47
	Imersão em água		Desagregou	Imersão em água	0,17
Argamassa com Metacaulino	20°C 65%HR	0,29	1,01	2,99	3,79
	Imersão em água	Imersão em água	0,82	3,09	7,26
Argamassa com Diatomite	20°C 65%HR	Não desmoldou	0,41	0,62	1,08
	Imersão em água		Desagregou	Imersão em água	1,93

Concluindo, a reação pozolânica do metacaulino é mais rápida, conseguindo-se retirar do molde e ensaiar mecanicamente 24 horas após a sua produção, podendo ser imerso em água sem se dissolver. O metacaulino também consegue reagir em grande extensão com o hidróxido de cálcio, tal como se pode verificar pela evolução da resistência mecânica desde as 24 horas até aos 28 dias de cura. A diatomite tem uma reação pozolânica bastante mais lenta, só podendo ser desmoldado três dias após a sua produção e a sua imersão em água apenas ocorre sete dias depois. Também a sua reação com o hidróxido de cálcio ocorre em menor extensão como se pode ver pela evolução da resistência mecânica com o tempo de cura.

3.2.4. Adjuvantes

O agente redutor de água de amassadura utilizado, normalmente denominado como superplastificante (SP), foi um produto comercial (Glenium 52 da BASF), com uma densidade de $1,1 \text{ g/cm}^3$ e com 30% de sólidos. Este produto é adequado para betões mas podendo ser utilizado em argamassas.

3.3. Caracterização do comportamento em fresco de argamassas e betões

3.3.1. Composição das argamassas e betões

A partir de uma areia e duas britas, utilizando o método de Faury, pretende-se desenvolver um betão com 350 kg de cimento por m³ de betão e com uma relação água/cimento de 0,6. A dimensão máxima de agregado foi limitada pelo reómetro de betão.

Efetuaram-se os cálculos e obteve-se como fórmula fundamental para este betão:

$$[350 \text{ kg cimento} + 423,2 \text{ kg areia} + 892,7 \text{ kg B1} + 406,1 \text{ kg B2} + 210 \text{ kg água} = 1 \text{ m}^3 \text{ de betão}]$$

A partir desta fórmula é possível obter a composição do betão em termos de percentagem mássica para os componentes sólidos, como pode ser verificado na Tabela 3.8, dado que a água é sempre 0,6 do cimento.

Tabela 3.8. Composição do betão para os componentes sólidos.

Componentes	Cimento	Areia	Brita 1	Brita 2
%(massa)	16,9	20,4	43,1	19,6

Executou-se a produção deste betão e o seu abaixamento, determinado através da utilização do cone de Adams foi de 8,5cm, correspondente a um betão mole segundo Faury. De acordo com Faury um betão mole pode apresentar a sua trabalhabilidade dentro de um intervalo de 5 a 10 cm de abaixamento de cone de Abrams. De acordo com a norma NP EN 206-1 de 2007 (Betão, Parte 1: Especificações desempenho, produção e conformidade), o betão de classe S1 deve apresentar um abaixamento entre 10 e 40 mm.

Sintetizando, a fórmula anteriormente apresentada será considerada a composição padrão para o betão mas, a sua trabalhabilidade deverá estar dentro do intervalo mais apertado, de 8 a 10 cm de abaixamento de cone de Abrams, porque o objetivo é produzir betões com trabalhabilidades bastante próximas.

Relativamente à argamassa base, a sua formulação foi determinada pela relação entre o cimento e a areia presentes na composição do betão. Desta forma a composição, em

termos de massa, a argamassa base é constituída por 40% de cimento, 60% de areia e, tal como no betão, uma razão água/cimento de 0,6.

Tabela 3.9. Composição das pastas e argamassas estudadas.

Denominação	Teor de substituição de pozolana (%)	Relação água / ligante	Teor (SP) relativamente ao total de sólidos (%)
Argamassas			
Padrão A_0.6W	0	0,6	0
A_xMK_yW_zSP	5;10;15;20;25;30	0,60 a 0,75	0 a 0,25
A_xD_yW_zSP	3;5;8;10	0,60 a 0,73	0 a 0,12
A_xMK_3D_yW_zSP	MK=5; 10; 15; 20; D=3	0,67 a 0,75	0 a 0,15
Pastas			
Pasta de cimento (PC)	0	0,35	0 a 0,50
Pasta de MK (PMK)	100	0,75	0 a 1,00
Pasta de D (PD)	100	1,50	0 a 2,50

Partindo da argamassa base efetua-se a substituição parcial do cimento por diferentes teores de pozolana. As amostras de argamassa em estudo foram referenciadas como A_xPZ_yW_zSP, onde A indica que se trata de uma argamassa, x é a percentagem (massa) de substituição do cimento por pozolana (PZ), y é a razão água / ligante (a/l) e o z é o teor em agente redutor de água (SP) relativamente à massa total de sólidos. Considera-se como teor de ligante o total da massa do cimento e da pozolana. A Tabela 3.9 mostra o conjunto de pastas e argamassas avaliadas em termos de comportamento reológico, considerando-se como pasta a mistura de cada componente (cimento, metacaulino ou diatomite) apenas com água, sem adição de agregados.

A preparação das argamassas foi efetuada de acordo com o seguinte procedimento: (i) As matérias-primas sólidas foram pesadas e colocadas separadamente; os ligantes (cimento e materiais pozolânicos) são colocados num saco de plástico e homogeneizados por agitação enquanto a areia é colocada noutra saco de plástico, (ii) a água é pesada dentro da taça de mistura e, neste momento pode ser adicionado o agente redutor de água que deve ser diluído com uma vareta (iii) os ligantes (cimento e pozolana) que se encontram dentro do saco de plástico são colocados sobre a água e procede-se a uma mistura manual para a molhagem dos sólidos (iv) coloca-se a taça de amassadura e

procede-se à mistura durante um minuto, a uma velocidade de 60 rpm (v) Sobre a pasta de cimento e material pozolânico coloca-se a areia e novamente se efetua uma mistura manual com a ajuda de uma pá (vi) coloca-se a taça na misturadora e mistura-se durante mais um minuto com velocidade de 60 rpm (vii) coloca-se a argamassa já misturada no copo do reómetro e inicia-se o ensaio de reologia. A Figura 3.7 mostra a misturadora usada para a preparação das argamassas.



Figura 3.7: Misturadora usada para a preparação de argamassas.

Relativamente às formulações dos betões, na prática, a sua composição baseou-se nas composições das argamassas, ou seja, produzem-se as argamassas e apenas se adicionam britas à mistura.

As amostras de betão em estudo foram referenciadas como **B_xPZ_yW_zSP**, onde B assinala que se trata de um betão, x é a percentagem (massa) de substituição do cimento por pozolana, y é a razão água / ligante (a/l) e o z é o teor em agente redutor de água (SP) relativamente à massa total de sólidos. Considerou-se o teor de ligante como o total da massa do cimento e da pozolana.

Tabela 3.10. Formulações de betão estudadas.

Denominação	Teor de substituição de pozolana (%)	Razão água / ligante	Teor de SP relativamente ao total de sólidos (%)
Padrão B_0.6W	0	0,60	0
B_xMK_yW_zSP	5, 10, 15, 20, 25 e 30	0,60 a 0,75	0 a 0,25
B_xD_yW_zSP	3; 5; 8; 10	0,60 a 0,73	0 a 0,12
B_xMK_3D_yW_zSP	MK=5; 10; 15; 20; D=3	0,67 a 0,75	0 a 0,15

Utilizando uma misturadora específica para betão (Figura 3.8), a mistura do betão é efetuada de acordo com o seguinte procedimento (Figuras 3.9 e 3.10):



Figura 3.8. Misturadora para preparação do betão.

- i) Coloca-se a água no contentor da misturadora com ou sem o agente redutor de água, e adiciona-se o cimento e, se for o caso, o material pozzolânico. Com a pá de pedreiro efetua-se uma mistura manual para molhagem dos sólidos e seguidamente com a misturadora atua durante 2 minutos.
- ii) Adiciona-se a areia, depois as britas até perfazer cinco minutos de mistura e o betão considera-se pronto.



Figura 3.9. Preparação da pasta de cimento e pozolana (2 minutos de mistura).

As britas foram utilizadas secas, tendo a brita B1 uma absorção de água de 1,7% e a brita B2 de 2,67%. Durante a produção do betão, aquando da introdução das britas, devido à absorção destas, na prática, obtém-se um betão com uma razão a/l de 0,5.

A decisão de utilizar as britas secas deve-se a dois fatores, (i) o facto de ser mais fácil controlar a humidade introduzida com as britas (ii) a consideração que com a utilização de britas secas, estas iriam absorver água e provavelmente algum material ligante, ficando com uma zona em redor das partículas de brita rica em argamassa, melhorando a interface entre a matriz cimentícia e o agregado. Um estudo efetuado com agregados leves [Lo et al, 2004], mostrou uma melhoria na ligação entre o agregado e a matriz cimentícia devido ao facto de algum cimento ter penetrado nos poros do agregado.



Figura 3.10. Adição da areia e das britas (1 minuto de mistura para a areia e 2 minutos de mistura para as britas).

3.3.2. Reometria de argamassas

A caracterização do estado fresco de argamassas envolveu inicialmente o estudo da reologia da argamassa padrão e, seguidamente, estudou-se o efeito da substituição parcial do cimento por metacaulino ou diatomite, duas pozolanas com propriedades físicas e químicas diferentes. Estudou-se também o efeito da substituição parcial do cimento por mistura conjunta de metacaulino com diatomite. Para cada uma das situações, avaliou-se o efeito do teor de substituição do material pozolânico, o estudo da utilização de água como componente controlador da trabalhabilidade e como alternativa o uso de um agente redutor de água de amassadura (superplastificante SP). Também foi efetuado um estudo reológico sobre o efeito do teor de SP na pasta de cimento, na pasta de metacaulino e sobre a pasta de diatomite.

O reómetro utilizado (Viskomat NT) foi especificamente desenhado para medir o comportamento reológico de argamassas. Este reómetro (Figura 3.11) consiste num

contentor cilíndrico onde a amostra é colocada quando já devidamente misturada, sendo este copo depois montado num suporte de rotação variável. Uma pá concêntrica de geometria adequada está montada numa cabeça que mede o torque, pois à medida que o copo roda, a resistência viscosa que a argamassa oferece ao fluxo através das lâminas da pá origina um torque que é continuamente registado ao longo de toda a duração do ensaio. Este reómetro é adequado para medir argamassas contendo partículas com dimensão até 2 mm.



Figura 3.11. Reómetro utilizado na avaliação reológica de argamassas (Viskomat NT).

Este ensaio permite determinar coeficientes proporcionais à tensão de cedência e à viscosidade plástica através da medida do torque com variação da velocidade de rotação. A velocidade de rotação do copo pode ser feita variar estabelecendo-se um perfil de variação da velocidade no tempo. A Figura 3.12 mostra o perfil utilizado para avaliar o comportamento reológico das argamassas e pastas estudadas.

Neste estudo, utilizou-se um perfil onde a velocidade permanece constante, a 100 rpm, ao longo de cerca de 90 minutos, mas com variações periódicas de velocidade, de 15 em 15 minutos, em que esta decresce até zero em 30 segundos e logo a seguir aumenta no mesmo período até às 100 rpm iniciais. A utilização deste perfil numa argamassa, reflete-se numa variação do torque (T) com o tempo de ensaio do tipo apresentado na Figura 3.13. Nas zonas de variação de velocidade, ascendentes e descendentes, constroem-se as curvas de fluxo (torque em função da velocidade). A Figura 3.14 mostra um exemplo de uma curva de fluxo aos 15 minutos de ensaio.

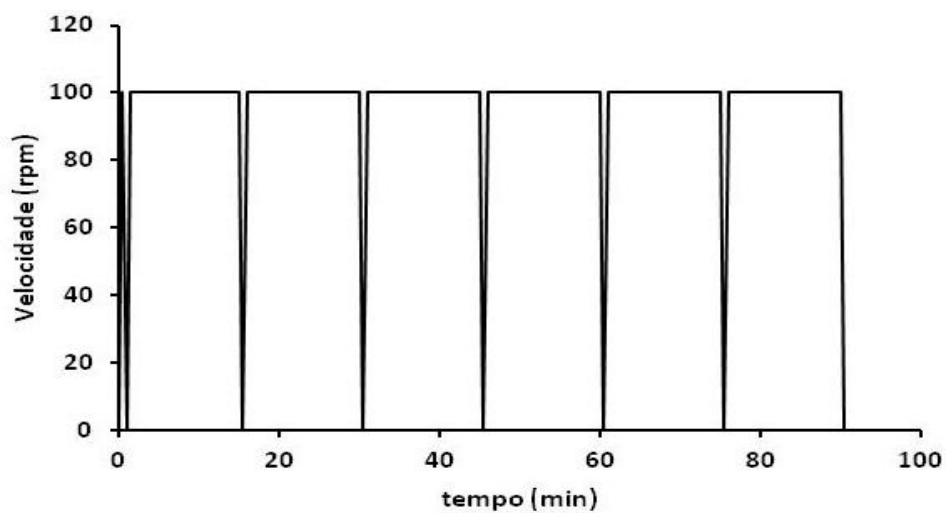


Figura 3.12. Perfil de velocidade em função do tempo para a caracterização reológica de argamassas.

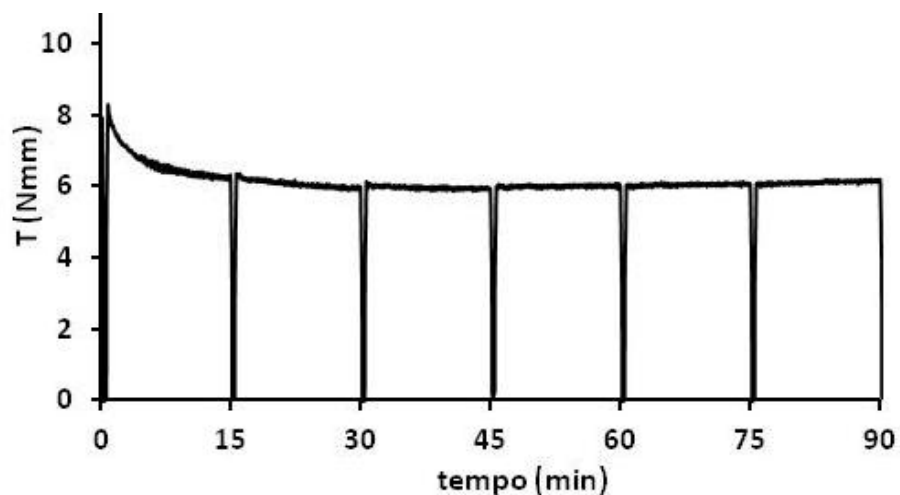


Figura 3.13. Variação dos valores do torque com o tempo de ensaio.

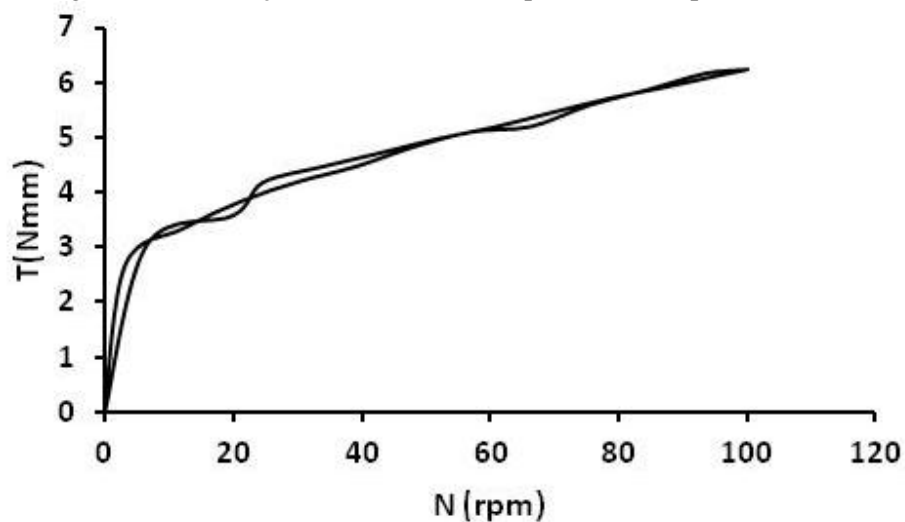


Figura 3.14. Variação dos valores do torque com a velocidade de ensaio, aos 15 minutos de ensaio (curva de fluxo).

Considerando um comportamento Binghamiano típico ($T=hN+g$), as curvas de fluxo permitem determinar os coeficientes proporcionais à viscosidade plástica (h) e à tensão de cedência (g) através do declive da reta e da ordenada na origem, respetivamente. A Figura 3.15 mostra, a partir da zona descendente da curva de fluxo, que a argamassa tem um comportamento de acordo com o modelo de Bingham, apresentando o parâmetro h , proporcional à viscosidade plástica, com um valor de 0,027 Nmmmin, e com o parâmetro g , proporcional à tensão de cedência, com um valor de 3,5358 Nmm. Determinando os parâmetros g e h em todas as descidas de velocidade (0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 minutos) é possível analisar a evolução de g e h ao longo do tempo de ensaio.

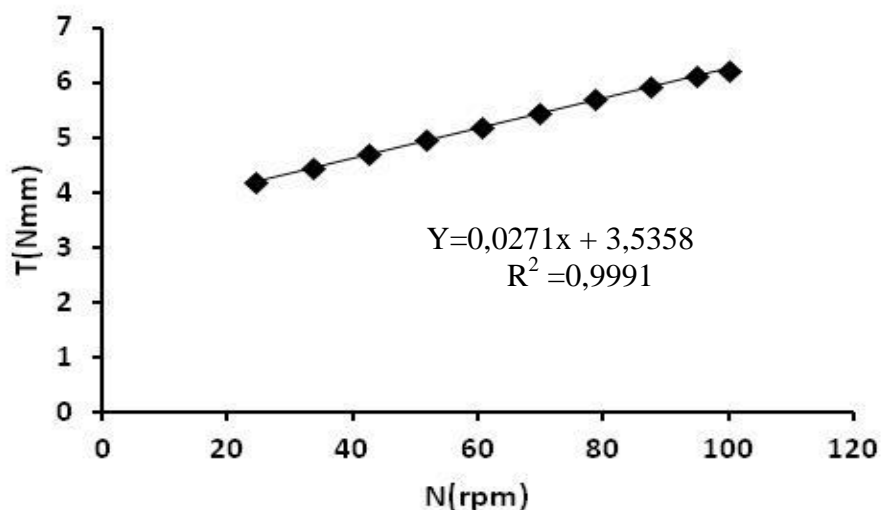


Figura 3.15. Determinação dos coeficientes g e h .

3.3.3. Reometria do betão

Relativamente ao betão, foi também usado um reómetro específico para este material (BT2 Schleibinger) patente na Figura 3.16. Este aparelho é composto por uma taça com 30 cm de diâmetro e uma profundidade de 10 cm, com capacidade para conter um volume de 20 l de betão. No centro da taça encontra-se um suporte onde a cabeça de medida do reómetro é colocada para rotação. A cabeça de medição tem dois pinos com 90 mm de comprimento, localizados a diferentes distâncias do centro (75 e 175 mm), permitindo assim a medição de diferentes velocidades angulares. Devido à diferença da velocidade entre os dois pinos, durante a rotação, este reómetro fornece os valores dos

coeficientes g e h , proporcionais à tensão de cedência e viscosidade do material, imediatamente a seguir à mistura do betão (Figura 3.17) [Golaszewsky 2007; Greim 1997].

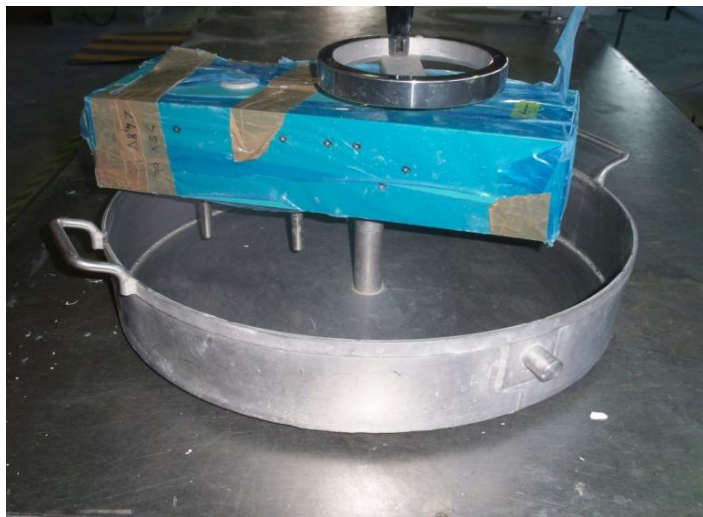


Figura 3.16. Reómetro para betão (BT2 Schleibinger).



Figura 3.17. Análise reológica do betão.

Simultaneamente realiza-se o ensaio de abaixamento do cone de Abrams, que se pretende que seja de 9 ± 1 cm, para que seja possível garantir uma trabalhabilidade constante (Figura 3.18).



Figura 3.18. Ensaio de abaixamento do cone de Abrams.

3.4. Caracterização no estado endurecido de argamassas e betões.

A caracterização das argamassas no estado endurecido foi efetuada apenas relativamente à sua resistência mecânica à flexão e à compressão. Para cada composição foram produzidos três provetes com dimensões de $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, de acordo com o estipulado na norma EN 1015-11:1999. As amostras foram sujeitas a um processo de cura durante 28 dias, numa sala climatizada com temperatura e humidade relativa controladas a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $95 \pm 5\%$ HR, respetivamente. O procedimento de ensaio foi efetuado de acordo com a norma EN 1015-11:1999, numa máquina de ensaios universal, marca Shimadzu e modelo AG-IC 100KN.

A caracterização do betão no estado endurecido foi efetuada tendo em conta diferentes propriedades e idades. Foi analisada a sua resistência mecânica à compressão a diferentes tempos de cura, tendo sido determinado também o seu módulo de elasticidade dinâmico (E) aos 28 dias. A microestrutura dos betões foi avaliada por microscopia eletrónica de varrimento, sendo a distribuição de porosidade avaliada através de porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM). Para a determinação do teor de portlandite $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ aos 28 dias efetuaram-se análises térmicas diferencial e termogravimétrica. O estudo da durabilidade do betão foi efetuado através de dois ensaios diferentes em que se avaliou a penetração de cloretos.

Foram assim produzidos, para cada composição, provetes de dimensões

100x100x100 mm³, que foram acondicionados numa câmara de temperatura e humidade relativa controladas (20±5 °C , 95±5% HR) para cura a diferentes idades.

A determinação da resistência à compressão dos provetes de betão foi efetuada de acordo com a norma NP EN 206-1:2007, aos 7 e 28 dias de cura e também aos 7 meses, numa máquina de ensaio à compressão, marca Form+Test, modelo Beta 2 3000 D.

Aos 28 dias de cura foi determinado o módulo de elasticidade dinâmico (E), através da utilização de um Pundit, marca CNS Farnell e modelo Pundit 6.

A análise diferencial e termogravimétrica efetuadas num aparelho de marca Setaram, modelo Labsys, permitem obter o nível de consumo de hidróxido de cálcio no betão aos 28 dias devido à presença dos materiais pozolânicos. As amostras para as análises térmicas apresentam uma massa de cerca de 3 mg. A amostra é preparada a partir de betão desagregado num almofariz e depois passado por um peneiro de 63 µm. Desta forma, os agregados são removidos e apenas a matriz cimentícia (cimento mais pozolana) é analisada. A análise térmica diferencial e gravimétrica realizadas simultaneamente permitem avaliar a variação de energia e da massa da amostra ao longo do aquecimento até 1000°C a uma taxa de 1°C por minuto.

Efetuuou-se a avaliação da microestrutura do betão através da utilização de um Microscópio Eletrónico de Varrimento da marca JEOL-JSM 6400, sendo o modo de observação das amostras através da técnica de eletrões retrodifundidos e, em simultâneo, complementadas com a informação da sua composição química através de um sistema EDS Inca X-Sight da marca Oxford Instruments, tendo-se utilizado tensões de feixe eletrónico de 15 keV. Devido ao seu teor de porosidade, as amostras para a microscopia tiveram que ser impregnadas com uma resina epóxi e depois sujeitas a sucessivos polimentos de modo a obter-se uma superfície polida mas coesa para observação e análise. Inicialmente desbasta-se a resina até se alcançar a amostra com uma máquina de polimento com um material abrasivo (carboneto de silício de grão 600) sendo depois o polimento executado com suspensões de diamante de granulometria decrescente (6, 3 e 1 µm), até se obter uma superfície da amostra perfeitamente polida.

A avaliação da porosidade foi efetuada por porosimetria de intrusão de mercúrio, num porosímetro AutoPore IV 9500 da Micromeritics. Permite medir diâmetros de poros de 360 micrómetros (para a pressão mínima = 0,5 psi) a 5,5 nanómetros (para a pressão máxima = 33 000 psi). As amostras para a porosimetria têm uma massa entre 1.5 a 3g e a

sua preparação envolveu a separação da argamassa dos agregados grossos (britas), ou seja, apenas a argamassa foi analisada.

Complementarmente avaliou-se a durabilidade do betão através da sua resistência à penetração de iões cloreto, usando-se dois métodos diferentes, um quantitativo e outro qualitativo. Em ambos os métodos, os provetes após desmoldagem são primeiro curados durante 28 dias numa câmara de ambiente condicionado ($20 \pm 5^\circ\text{C}$ e $95 \pm 5\%$ HR) e depois imersos em solução salina artificial (Tabela 3.11) durante seis meses. Pretendeu-se com esta solução salina simular a composição da água do mar, sendo o cloreto de sódio o elemento preponderante [Bai et al 2003]. Após este tempo as amostras são testadas em termos do nível de penetração de cloretos.

Tabela 3.11. Composição solução aquosa salina artificial.	
Componente	Concentração (g/l)
NaCl	30,0
MgCl ₂	6,0
MgSO ₄	5,0
CaSO ₄ .2H ₂ O	1,5
KHCO ₃	0,2

No primeiro método, quantitativo, usaram-se amostras cúbicas de 100x100x100 mm³, as quais, antes da imersão são impermeabilizadas com uma resina em quatro das faces, ficando duas faces, opostas expostas à solução salina [Bai et al 2003]. Após seis meses de imersão as amostras foram cortadas em três fatias (a seco), com cerca de 15,6 mm cada, até ao centro do provete (Figura 3.19). Desta forma obtém-se uma fatia do exterior do provete, que esteve imediatamente em contacto com a água, mas também uma segunda fatia da zona intermédia e uma terceira fatia do centro do provete. Cada uma das fatias é sujeita a moagem para se obter um pó com uma granulometria inferior a 150 µm, seguindo-se um processo em que 5 g de cada amostra é dissolvida em 100 ml de HNO₃ a 10% (massa/massa) e fervida durante 25 minutos. A amostra é então filtrada com ajuda de água destilada até um volume de 500 ml. A determinação do teor em cloretos é efetuada

por potenciometria através de um elétrico seletivo (Consort, modelo C860), de acordo com a norma EN 1015-17:2000 (Determination of water-soluble chloride content of fresh mortars).

Com este procedimento consegue-se um perfil da penetração de cloretos (mg/kg) desde o exterior até ao centro da amostra.



Figura 3.19. Amostra de betão com 28 dias de cura em ambiente controlado e 6 meses em água do mar, cortada em três fatias desde o exterior até ao interior da amostra.



Figura 3.20. Amostras de betão com geometria cilíndrica.

No segundo processo, de carácter qualitativo [Bamforth et al 1999], foram utilizadas amostras cilíndricas (Figura 3.20), com dimensões de 300 mm de altura por 150 mm de diâmetro, que depois da cura atrás citada e permanência na solução salina durante 6 meses, são sujeitas a um ensaio de resistência à compressão diametral (ensaio brasileiro). Após o ensaio de compressão diametral o cilindro aberto ao meio é, nessa altura, pulverizado com nitrato de prata que, ao reagir com os cloretos, dá origem a uma cor cinzenta prateada. A intensidade da cor fornece uma indicação da profundidade de penetração, desde o exterior até ao interior da amostra, permitindo comparar as diversas composições.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Comportamento reológico de argamassas e betões

O estudo do comportamento reológico de argamassas e betões que aqui se apresenta iniciou-se com a avaliação da argamassa padrão e do betão padrão correspondente para depois servir de base à análise do papel de componentes relevantes na reologia como o efeito da introdução de pozolanas (metacaulino e diatomite) em substituição parcial do cimento, o efeito do teor da água de amassadura e o efeito de um adjuvante redutor de água de amassadura no controlo da trabalhabilidade de argamassas e betões com pozolanas. Pretende-se com estas alterações estabelecer uma correlação entre o comportamento reológico das argamassas com os betões correspondentes.

4.1.1. Caracterização reométrica da argamassa padrão

Este estudo iniciou-se com a avaliação do comportamento reológico da argamassa padrão (A_0.60W) formulada de modo a representar a argamassa presente no betão padrão respetivo. Assim, esta argamassa apresenta uma relação, em massa, entre o cimento e a areia igual à do betão padrão (40:60 de Cimento:Areia), sendo também produzida com a mesma razão água/ligante (a/l de 0,6). A Figura 4.1 mostra o resultado do ensaio reológico à argamassa padrão efetuada com o reómetro Viskomat PC. Este ensaio permite o registo da variação de torque (T) ao longo do tempo (t) com uma variação pré-estabelecida da velocidade de rotação (N). É possível observar um ligeiro decréscimo inicial do valor do torque após o início do ensaio, devido à destruição irreversível dos aglomerados das partículas de cimento e à sua orientação com o fluxo [Bhatty et al 1984]. Este decréscimo é pouco acentuado porque esta argamassa contém um teor de água elevado quando comparada com uma argamassa convencional, sendo por isso uma argamassa bastante fluida. Uma argamassa com uma formulação convencional, tipicamente com menor teor de cimento e de água de amassadura, apresenta valores de torque estabilizados superiores a 50 Nmm [Senff₁ et al 2009, Senff₂ et al 2009, Paiva et al 2009, Seabra et al 2009]. A partir de cerca de 20-30 minutos de duração do ensaio o valor do torque mantém-se constante até ao fim do teste (90 minutos).

A partir da variação de torque nos momentos em que se varia a velocidade de rotação (de 15 em 15 minutos) no ensaio é possível construir as curvas de fluxo (T vs. N), de onde se determinam os parâmetros reológicos g e h , coeficientes proporcionais à tensão de cedência e viscosidade plástica, respetivamente.

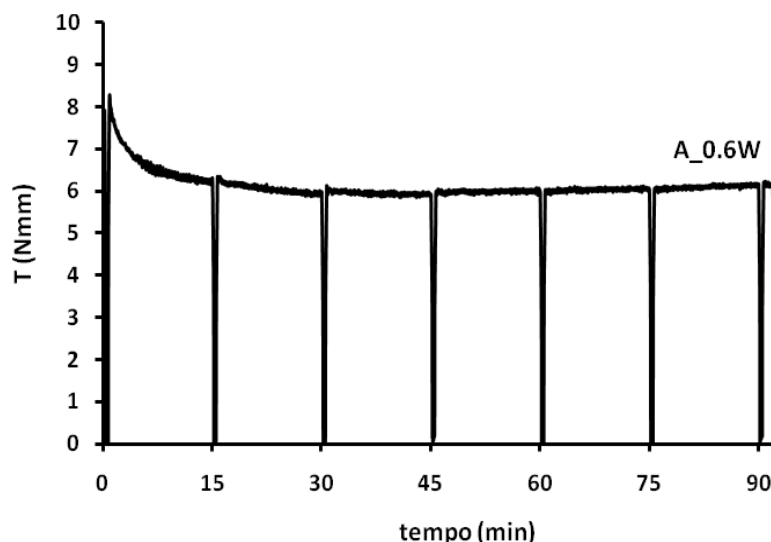


Figura 4.1. Variação do valor do torque para a argamassa padrão durante os 90 minutos de teste.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram as curvas de fluxo para a argamassa padrão, aos 0 minutos (início do ensaio) e aos 90 minutos (fim do ensaio), respetivamente. No início do ensaio, pode-se observar que existe alguma área de histerese, entre a curva correspondente às medidas em velocidade ascendente e descendente. A desaglomeração das partículas ao longo do ensaio faz com que esta histerese seja diminuída, tornando-se as curvas de fluxo ascendente e descendente mais idênticas, tal como se pode verificar nas correspondentes aos 90 minutos de ensaio. Os parâmetros g e h , determinados aos 90 minutos, para a argamassa padrão, estão patentes na Figura 4.4, apresentando o valor de 0,03 Nmmmin para o parâmetro h e o valor de 3,29 Nmm para o parâmetro g . Estes valores são bastante baixos quando comparados com uma argamassa convencional, em que o teor de água e de cimento são menores [Sennf₁ 2009, Senff₂ 2009, Seabra 2009, Paiva 2009]. Como se verá mais à frente, pode-se analisar o comportamento destes dois parâmetros com o tempo de duração do ensaio, determinando o seu valor em todos os momentos em que exista variação de velocidade, ou seja, aos 0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 minutos.

As figuras 4.2 a 4.4 confirmam um comportamento tipicamente Binghamiano para esta argamassa, que se caracteriza por uma relação linear entre a tensão e a deformação a partir de um valor mínimo de tensão, denominado como tensão de cedência ou de Bingham. Após este valor a relação é linear com uma constante de proporcionalidade relacionada com a viscosidade plástica ($T=g+hN$). Neste caso, esta argamassa tem um valor de h de 0,029 Nmm min, correspondente ao declive da reta e g apresenta um valor de 3,29 Nmm, correspondente á ordenada na origem.

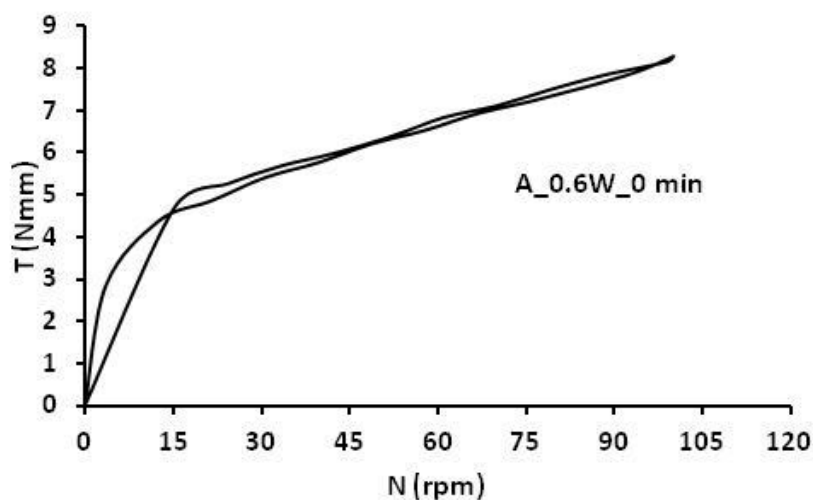


Figura 4.2 Curva de fluxo para a argamassa padrão, aos 0 minutos de ensaio.

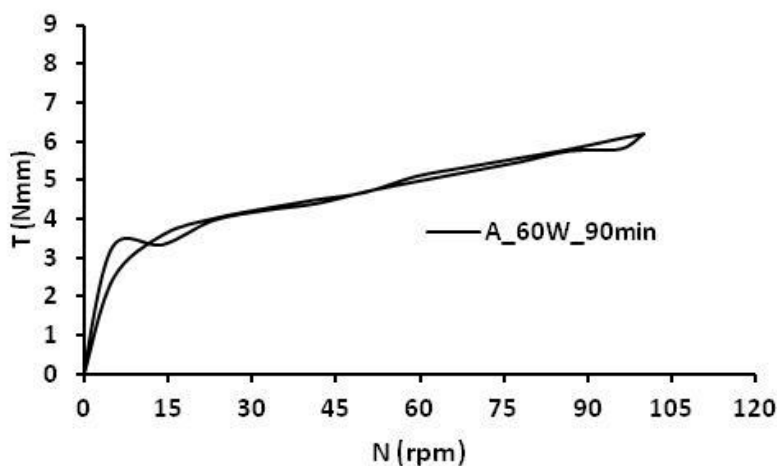


Figura 4.3. Curva de fluxo para a argamassa padrão, aos 90 minutos de ensaio.

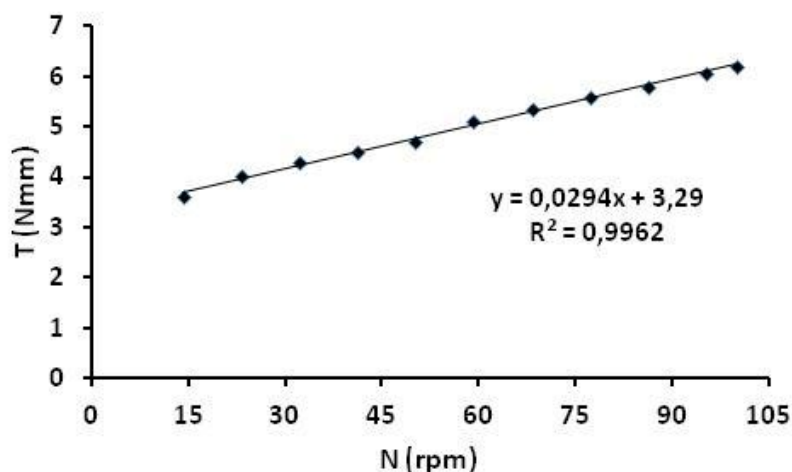


Figura 4.4. Valores dos parâmetros h e g , determinados na argamassa padrão, aos 90 minutos de ensaio.

4.1.2. Efeito da introdução das pozolanas no comportamento reológico das argamassas e betões.

4.1.2.1. Incorporação de metacaulino

O efeito da substituição do cimento por metacaulino (MK), em teores de 10, 20 e 30% (ponderal), está patente na Figura 4.5. O aumento do teor de substituição do cimento, mantendo constante o teor em água de amassadura (razão água/ligante (w/l) de 0.60), implica um espessamento do sistema, com consequente aumento do valor do torque. As partículas de metacaulino são muito finas, apresentando uma elevada área superficial, da ordem dos $16,2 \text{ m}^2/\text{g}$ (BET) e, devido a esse facto, têm uma elevada tendência para aglomerar, tal como se pode observar na Figura 4.6.

A água presente no sistema é adsorvida fisicamente na superfície das partículas ou dos aglomerados de partículas, promovendo uma diminuição da água livre para lubrificação do sistema induzindo, consequentemente, um espessamento que se reflete num aumento de valor do torque. Analisando o comportamento do torque com o tempo de ensaio, verifica-se um decréscimo inicial do valor do torque devido a alguma desaglomeração. Esta desaglomeração contribui para aumentar ainda mais a área superficial exposta para a água adsorver. A adsorção contínua da água à superfície das partículas ou aos aglomerados, promove um espessamento proporcional no sistema e, o valor do torque aumenta ao longo da duração do ensaio. Este incremento foi tanto maior quanto maior o teor em metacaulino na argamassa.

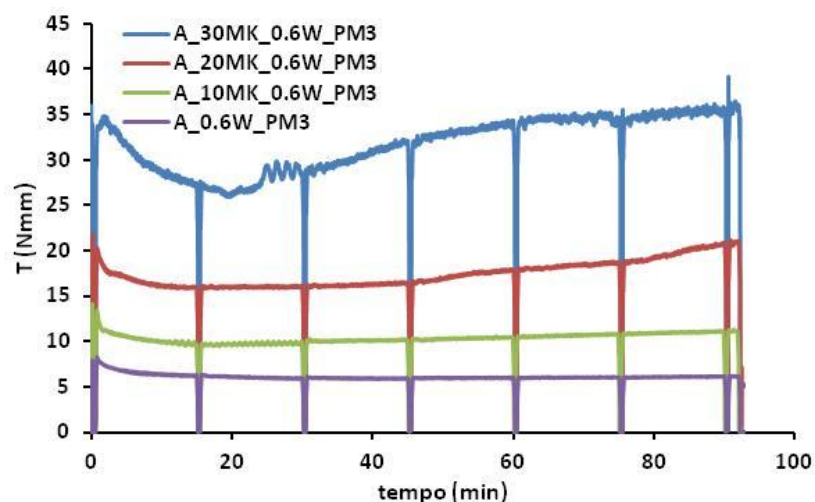


Figura 4.5. Efeito do aumento do teor de substituição do MK sobre o valor do torque, durante o tempo de ensaio.

O espessamento do sistema tem efeito sobre a viscosidade plástica e sobre a tensão de cedência, ou seja, quanto maior o teor de metacaulino, maiores os valores apresentados pelos parâmetros h e g , como se pode ver nas Figuras 4.7 e 4.8. Observa-se um decréscimo inicial dos valores de h devido a alguma desaglomeração do metacaulino pois é mais fácil mover partículas pequenas do que partículas maiores e, após essa diminuição, os valores de h mantêm-se constantes até ao final do ensaio.

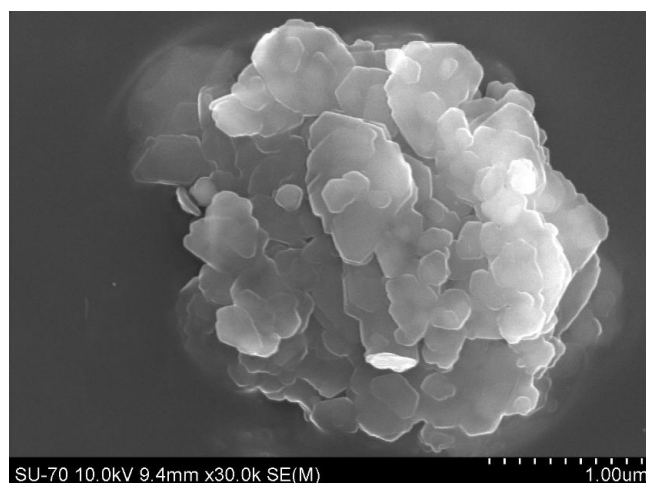


Figura 4.6. Imagem de um aglomerado de partículas de metacaulino obtida por MEV.

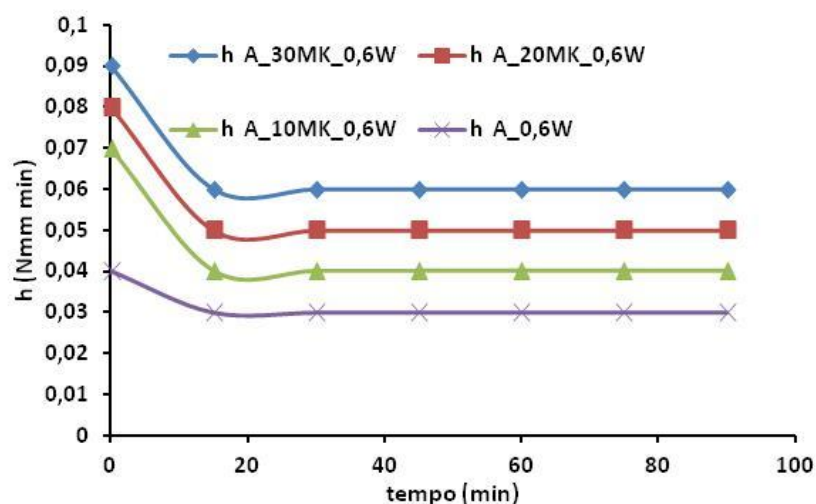


Figura 4.7. Efeito do aumento do teor de substituição do MK sobre o parâmetro h , durante os 90 minutos de ensaio.

Relativamente à tensão de cedência, o efeito ainda é mais evidente; verificando-se um aumento crescente do parâmetro g com o aumento do teor de metacaulino, especialmente para a formulação com 30% de metacaulino (Figura 4.8).

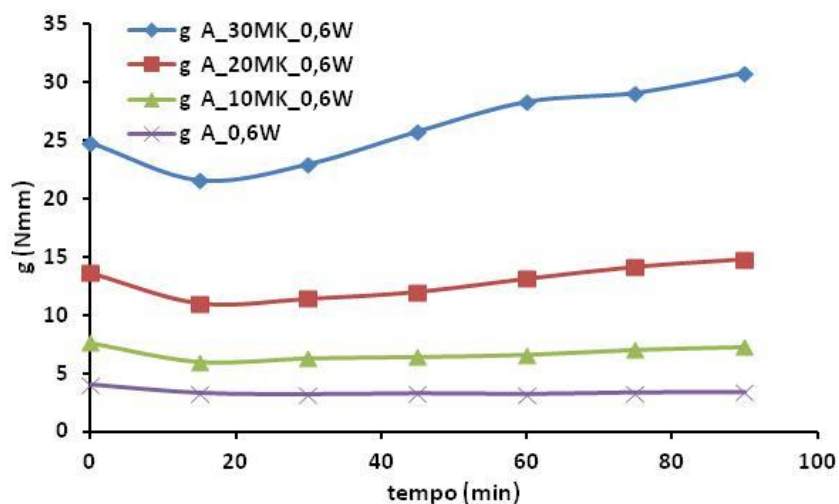


Figura 4.8. Efeito do aumento do teor de substituição do MK sobre o parâmetro g , proporcional à tensão de cedência, durante os 90 minutos de ensaio.

A Figura 4.9. mostra as curvas de fluxo aos 90 minutos, para as formulações anteriores. A escolha dos 90 minutos permite apreciar a evolução da área de histerese para as diferentes formulações. Escolheu-se este tempo de ensaio pelo facto da argamassa já se encontrar estabilizada. Confirmando os resultados observados anteriormente, observa-se

um aumento da área de histerese com o aumento do teor em metacaulino, sendo este incremento mais evidente para os 30% de metacaulino.

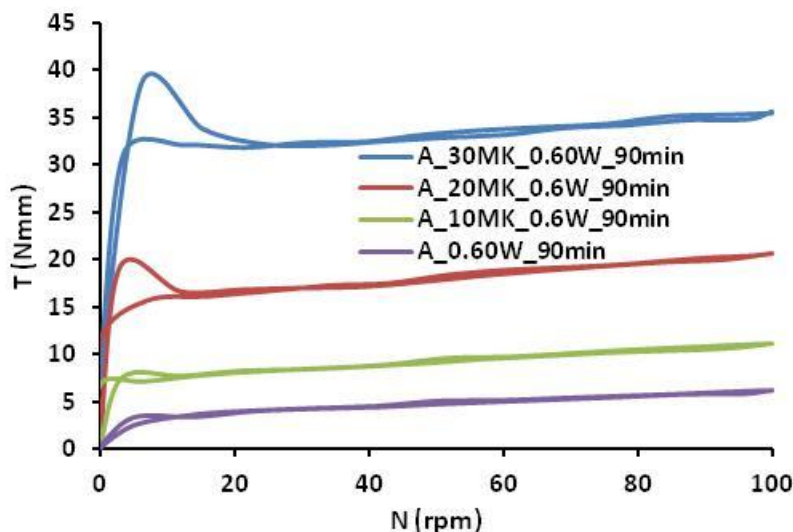


Figura 4.9. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK.

Este aumento da área de histerese corresponde a um incremento da tixotropia do sistema, pois para o mesmo teor de água, a quantidade de metacaulino é mais elevada, não sendo a velocidade de rotação nem o tempo de teste suficientes para desaglomerar a maior parte do material pozolânico, que se volta a estruturar mais facilmente quando da diminuição da velocidade de rotação.

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros h , g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com valores crescentes de MK, mantendo constante a água de amassadura.

Composição Argamassa	h (Nmm min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaixamento (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_10MK_0,60W	0,04	7,28	B_10MK_0,60W	20409	6083	1
A_20MK_0,60W	0,05	14,80	B_20MK_0,60W	21537	6474	0,5
A_30MK_0,60W	0,06	30,78	B_30MK_0,60W	23061	6729	0,3

Nas misturas de betão, a desaglomeração e estabilização da argamassa ocorre muito mais rapidamente, devido ao efeito moente dos agregados grossos presentes na formulação [Williams et al 1999]. A partir das argamassas produziram-se os betões

correspondentes. Na produção dos betões prepara-se a argamassa e só depois se introduzem os agregados grossos.

A tabela 4.1 mostra os valores obtidos para os parâmetros h e g , aos 90 minutos, para as argamassas, comparativamente com os resultados obtidos para o betão equivalente. Os valores para as diferentes formulações de betão foram obtidos por um reómetro específico (BT2 Schleibinger) logo após a mistura dos componentes. No caso dos betões apresenta-se também, nesta tabela, o valor de trabalhabilidade determinado pelo abaixamento de cone de Abrams (abaixamento).

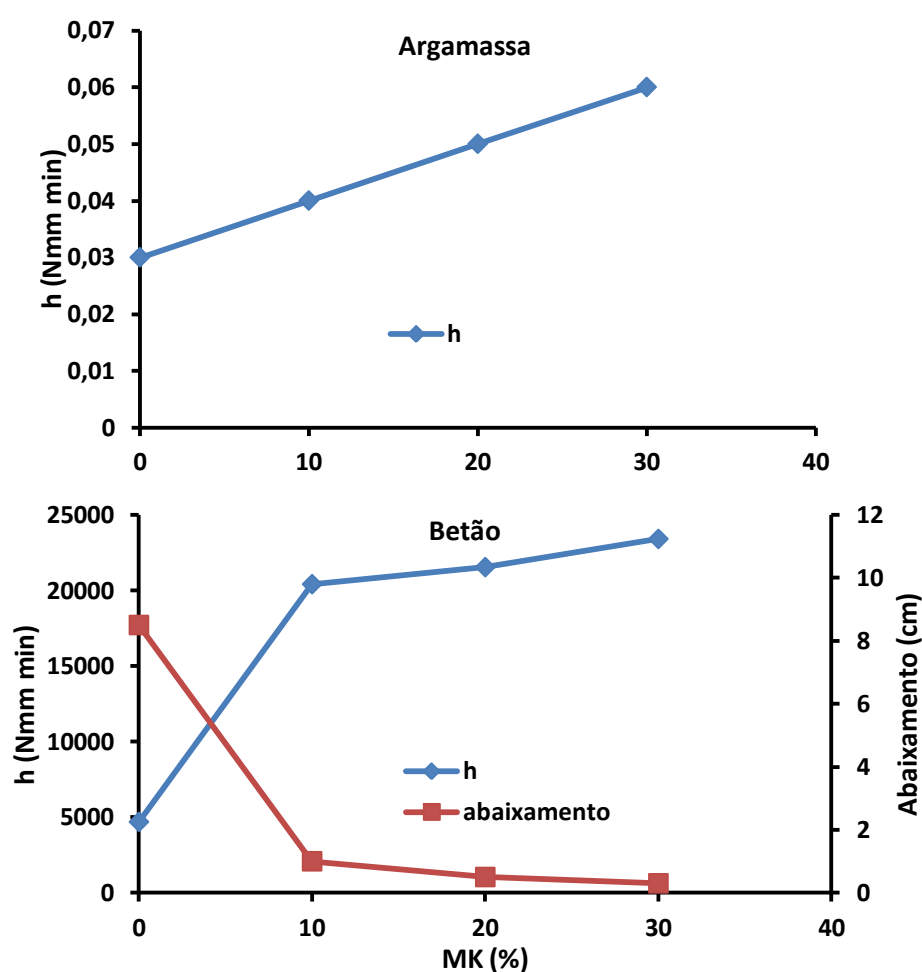


Figura 4.10. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função do teor de MK, mantendo a água constante ($w/l=0.6$), para as argamassas e betões correspondentes.

Relativamente ao efeito do teor de metacaulino nas argamassas, observa-se um aumento dos valores dos parâmetros h e g , embora com um aumento mais acentuado para a tensão de cedência. Os betões correspondentes, quando comparados com o betão padrão,

mostram um aumento significativo dos valores da viscosidade e da tensão de cedência sendo, este efeito, bastante evidente nos valores obtidos para o abaixamento do cone de Abrams. Consequentemente, a substituição do cimento por metacaulino diminui drasticamente a trabalhabilidade e, os betões apresentam valores de abaixamento muito inferiores ao pretendido.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam o comportamento de g e h comparativamente com o abaixamento do cone de Abrams, para as argamassas com teores crescentes de metacaulino e para os betões de formulação correspondente, mantendo o teor em água. Em ambos os casos, a diminuição do abaixamento, correspondente a uma diminuição da fluidez do sistema, implica um aumento significativo na viscosidade e na tensão de cedência das argamassas e dos betões. Existe assim uma relação directa evidente entre a reologia da argamassa e do betão correspondente.

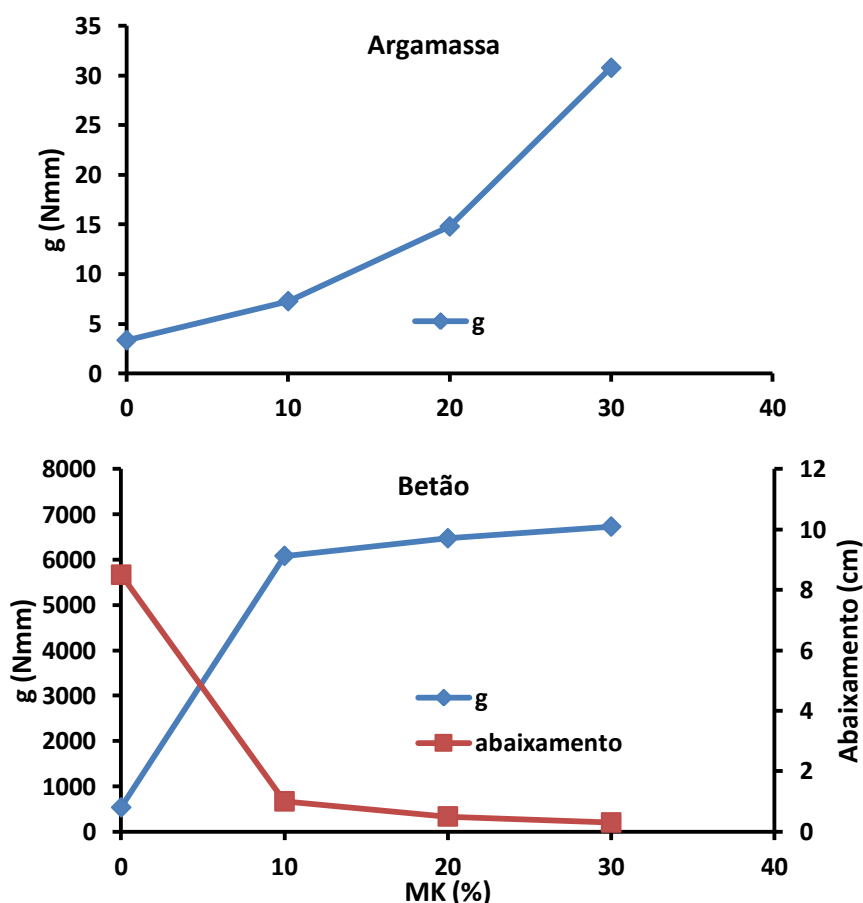


Figura 4.11. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, mantendo a água constante (0.6), para as argamassas e betões correspondentes.

4.1.2.2. Incorporação de diatomite

O comportamento do valor do torque, durante o tempo de ensaio, para as formulações de argamassas em que o cimento é substituído por diatomite em teores de 3, 5, 8 e 10% (ponderal), está presente na Figura 4.12. O efeito de espessamento pela substituição do cimento por diatomite (D) é ainda mais intenso do que o observado no metacaulino. A formulação com 10% de substituição de cimento por diatomite apresenta o mesmo valor de torque que apresentava a composição com 30% de metacaulino. Este efeito não pode ser justificado apenas pela finura das partículas pois a área superficial da diatomite ($8,9 \text{ m}^2/\text{g}$) é cerca de metade da área superficial do metacaulino ($16,2 \text{ m}^2/\text{g}$).

A razão deste espessamento está relacionada com a porosidade das partículas de diatomite, tal como se pode observar por microscopia eletrônica de varrimento (MEV) onde a porosidade das partículas de diatomite é bem visível (Figura 4.13). A porosidade na diatomite apresentou valores superiores a 96%. A elevada absorção de água retira rapidamente a água do sistema sendo, assim, a razão deste efeito de espessamento drástico.

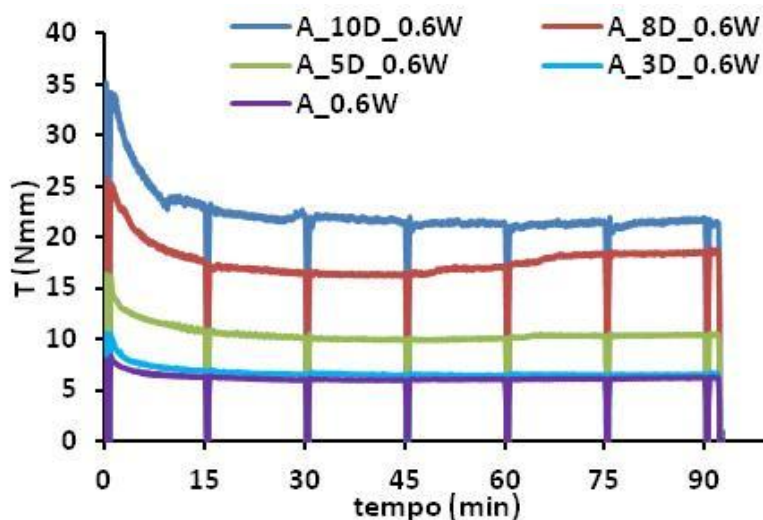


Figura 4.12. Efeito do teor de substituição de Diatomite (D) sobre o valor do torque, durante o tempo de ensaio.

Relativamente ao comportamento do valor do torque durante o tempo de ensaio, para as diferentes composições, observa-se como no metacaulino um decréscimo inicial, correspondente a alguma desaglomeração e orientação com o fluxo. Após essa diminuição

inicial, pode-se considerar que o valor do torque se mantém constante até ao final do ensaio.

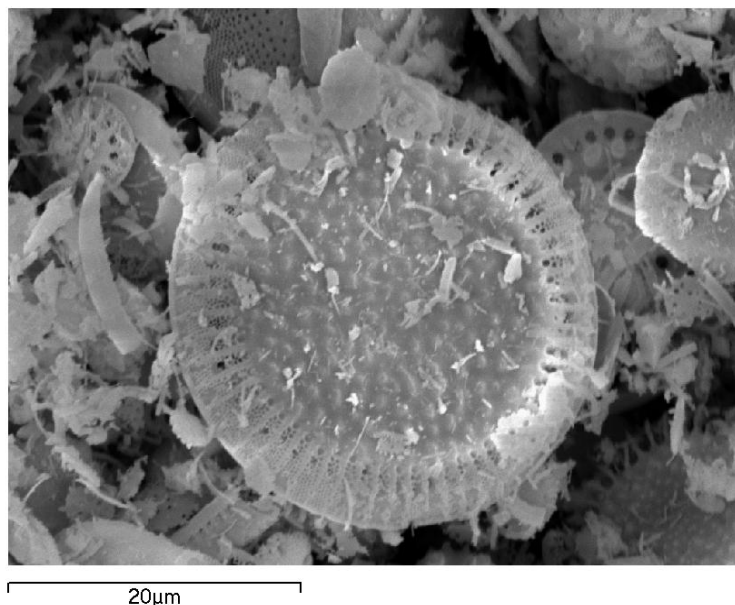


Figura 4.13. Partículas de diatomite, observadas ao MEV.

Relativamente à viscosidade plástica (parâmetro h), verifica-se um incremento muito elevado, do seu valor com o aumento do teor em diatomite. Tal como aconteceu para o metacaulino, observa-se um decréscimo inicial do valor de h até cerca de 15 minutos de teste e, a partir deste momento, pode-se considerar que os valores de h estabilizam, embora com valores mais elevados que os apresentados pelas composições com metacaulino (Fig.4.14). O comportamento da tensão de cedência (g), na Figura 4.15, também mostra um aumento proporcional ao aumento do teor de diatomite mas, no entanto, os valores de g são menores que os apresentados pelas composições com metacaulino.

A porosidade da diatomite poderá ser responsável por este efeito, na medida em que sendo as partículas muito leves, relativamente ao seu tamanho, começam a fluir com uma tensão aplicada mais baixa.

As curvas de fluxo, representadas na Figura 4.16, no caso da diatomite, mostram um comportamento idêntico ao apresentado pelas formulações com metacaulino. Verifica-se um aumento da área de histerese com o aumento do teor em diatomite devido a um aumento da tixotropia do sistema, consequência do espessamento da argamassa.

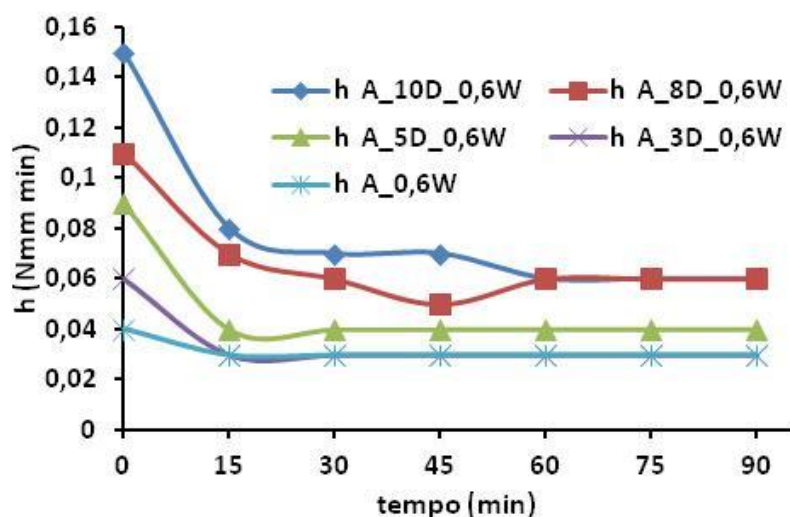


Figura 4.14. Efeito do aumento do teor de substituição de D sobre o parâmetro h, proporcional á viscosidade plástica, para os 90 minutos de ensaio.

A tabela 4.2 mostra os valores obtidos para os parâmetros h e g, aos 90 minutos, para as argamassas, comparativamente com os resultados apresentados pelos betões equivalentes. A utilização de diatomite nas argamassas tem um efeito parecido com o observado quando se utilizou metacaulino e, consequentemente, os resultados nos betões correspondentes também mostram que a substituição do cimento por diatomite, mesmo em menores quantidades, reduz a trabalhabilidade ao betão, como se pode observar pelos resultados do abaixamento de cone de Abrams e evidenciado pelos valores da viscosidade e da tensão de cedência.

Tabela 4.2. Valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams (Abaixamento) para as argamassas e betões com teores crescentes de diatomite, mantendo o teor em água constante.

Composição Argamassa	h (Nmm min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaixamento (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_5D_0,60W	0,04	6,36	B_5D_0,60W	19390	5906	0,6
A_8D_0,60W	0,06	12,57	B_8D_0,60W	21419	6730	0,5
A_10D_0,60W	0,06	15,9	B_10D_0,60W	25450	7245	0,4

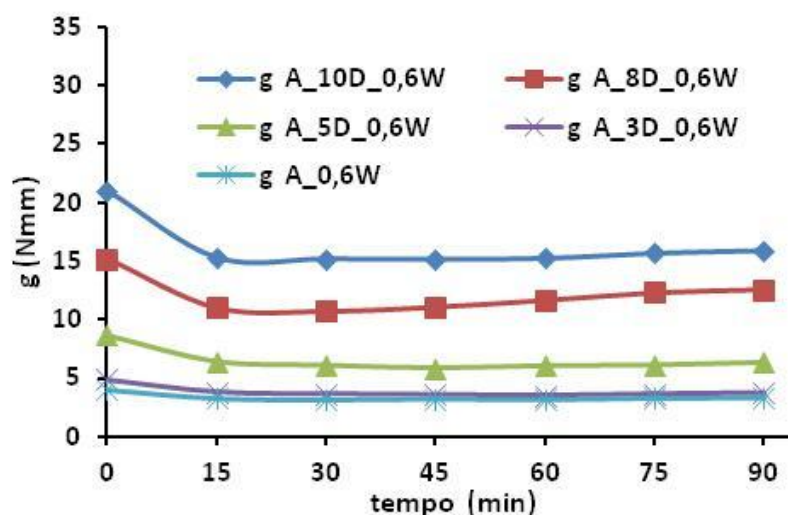


Figura 4.15. Efeito do aumento do teor de substituição de D sobre o parâmetro g, proporcional à tensão de cedência, para os 90 minutos de ensaio.

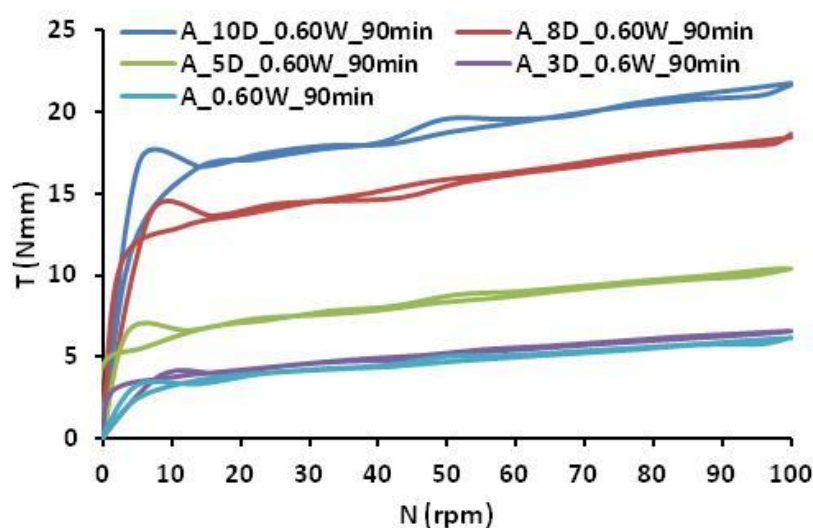


Figura 4.16. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de D.

Observa-se, um aumento da viscosidade e da tensão de cedência com a diminuição da trabalhabilidade das argamassas e respectivos betões. As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam o comportamento de g e h comparativamente com o abaixamento do cone de Abrams (abaixamento), para as argamassas com teores crescentes de diatomite e os betões de formulação correspondente, mantendo o teor em água.

A diminuição do abaixamento, correspondente a uma diminuição da fluidez do sistema, implica um aumento significativo na viscosidade e na tensão de cedência das argamassas e dos betões com diatomite.

Tal como no caso das formulações com metacaulino, também com a incorporação de diatomite se consegue observar uma relação direta entre o comportamento reológico das argamassas com os betões correspondentes.

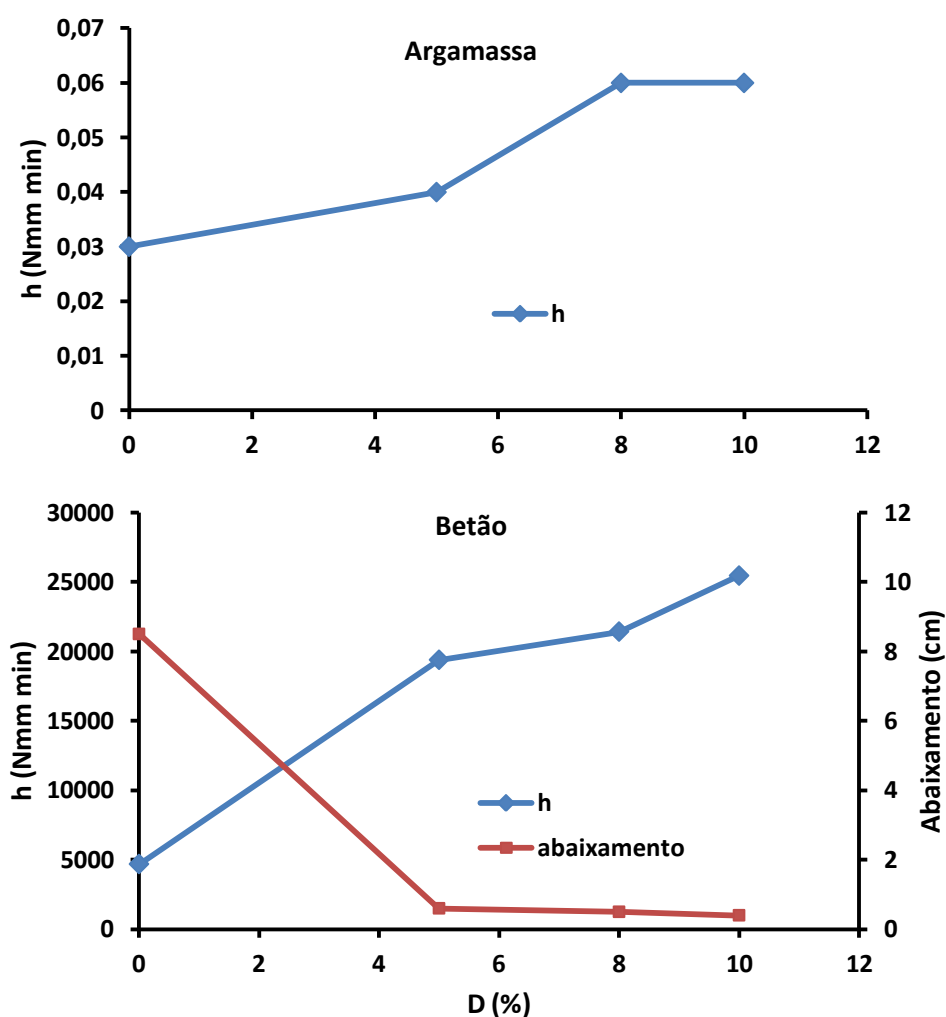


Figura 4.17. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função do teor de D , mantendo a água constante (0,6), para as argamassas e betões correspondentes.

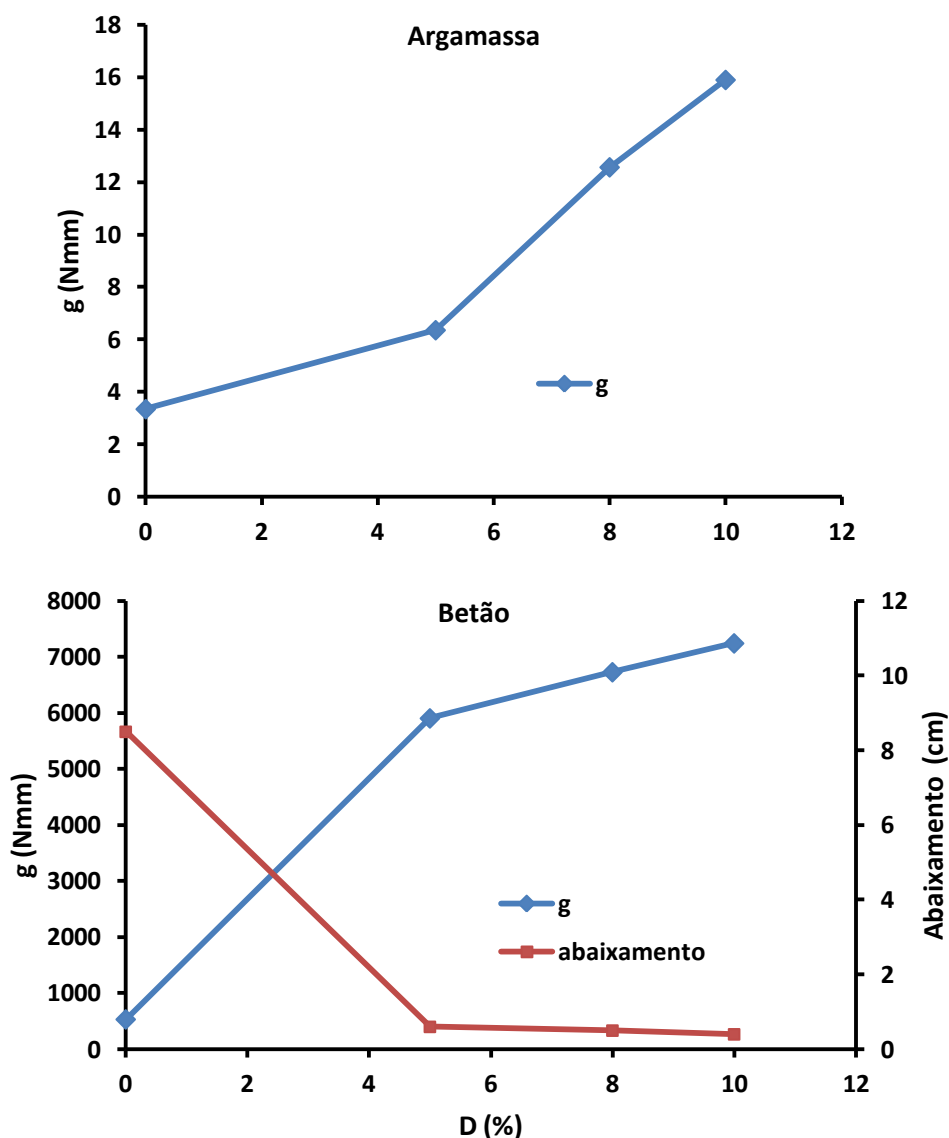


Figura 4.18. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função do teor de D , mantendo a água constante (0,6), para as argamassas e betões correspondentes.

4.1.3. Efeito do teor em água de amassadura sobre o comportamento reológico de argamassas e betões com pozolanas.

A argamassa padrão, com uma relação a/l de 0,6, garante um betão padrão com um abaixamento do cone de Abrams entre 8 e 10 cm. A substituição parcial do cimento pelo metacaulino e pela diatomite, como se viu anteriormente, vai espessar as argamassas e consequentemente, o valor de trabalhabilidade nos betões correspondentes vai diminuir. O teor da água de amassadura tem um efeito drástico sobre a trabalhabilidade das argamassas

e betões [Fernandes et al 2005], consequentemente, procurou-se aproximar a trabalhabilidade das argamassas com metacaulino e diatomite do comportamento reológico apresentado pela argamassa padrão através da alteração do teor em água de amassadura.

4.1.3.1. Incorporação de metacaulino

A Figura 4.19 mostra a aproximação do comportamento reológico das argamassas com metacaulino ao apresentado pela argamassa padrão, através da alteração da quantidade de água usada na amassadura. Pode-se considerar que se conseguiu sobrepor as curvas de todas as argamassas através da modificação do teor de água para os valores indicados na figura citada.

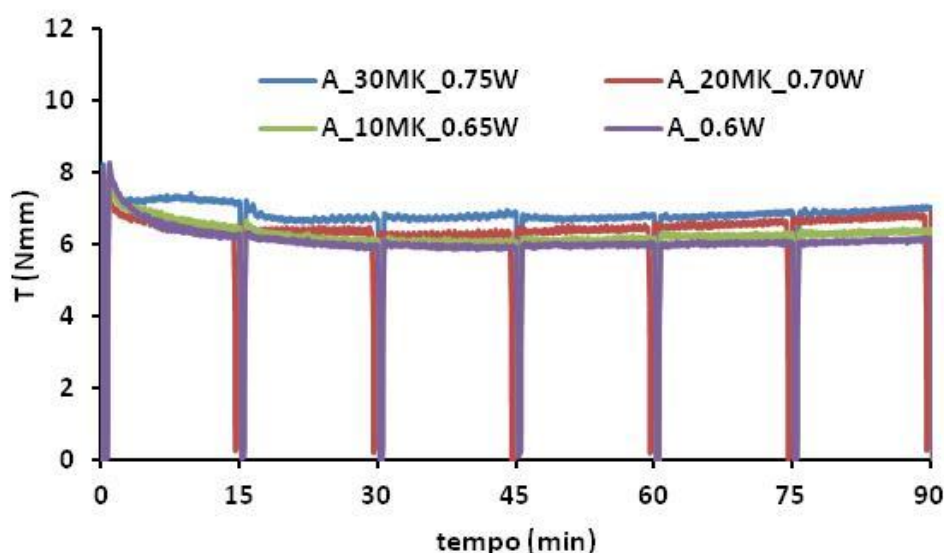


Figura 4.19. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK e, teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

Relativamente aos parâmetros h e g, patentes nas Figura 4.20 e 4.21, verifica-se uma boa proximidade entre os valores obtidos para a argamassa padrão e as argamassa com 10, 20 e 30% de metacaulino.

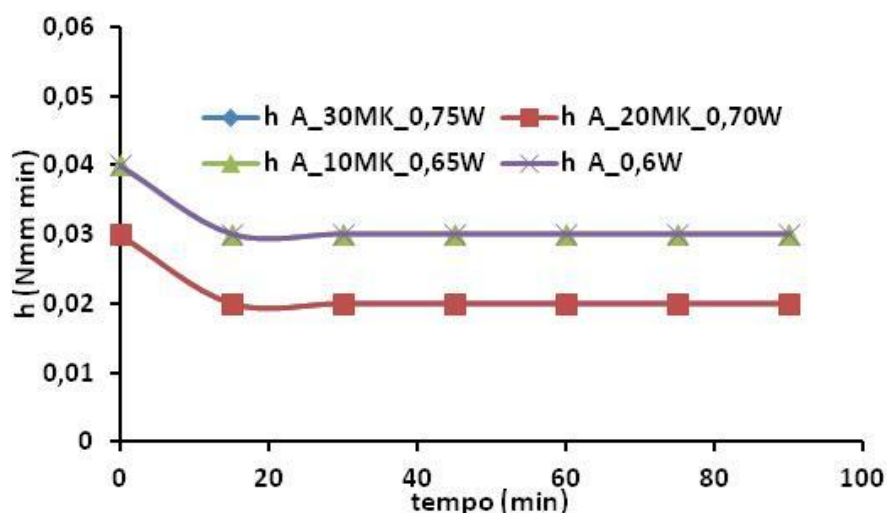


Figura 4.20. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

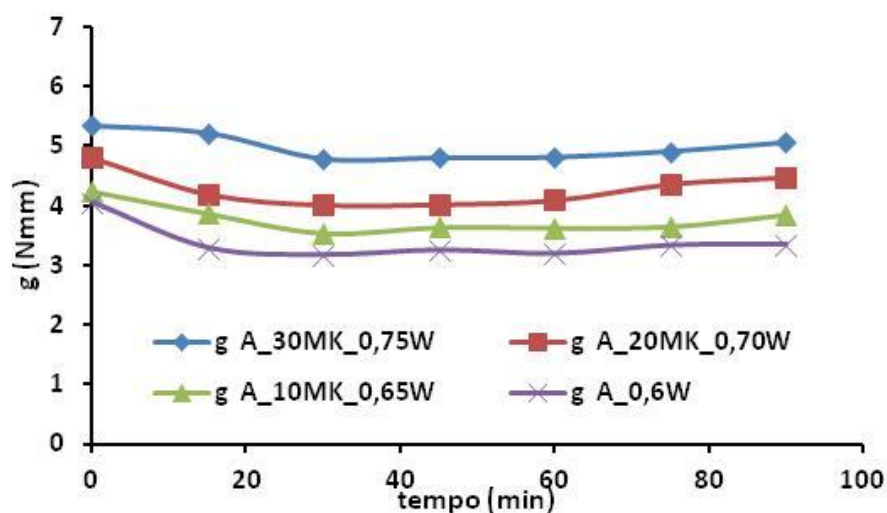


Figura 4.21. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

Observando as áreas de histerese das curvas de fluxo presentes na Figura 4.22, apenas a argamassa com 30% de metacaulino aparenta ter uma área ligeiramente superior e a diferença dos valores do torque para as diferentes composições não é elevada. Desta forma, a partir das argamassas com trabalhabilidade corrigida através da alteração do teor de água, poder-se-á produzir betões correspondentes.

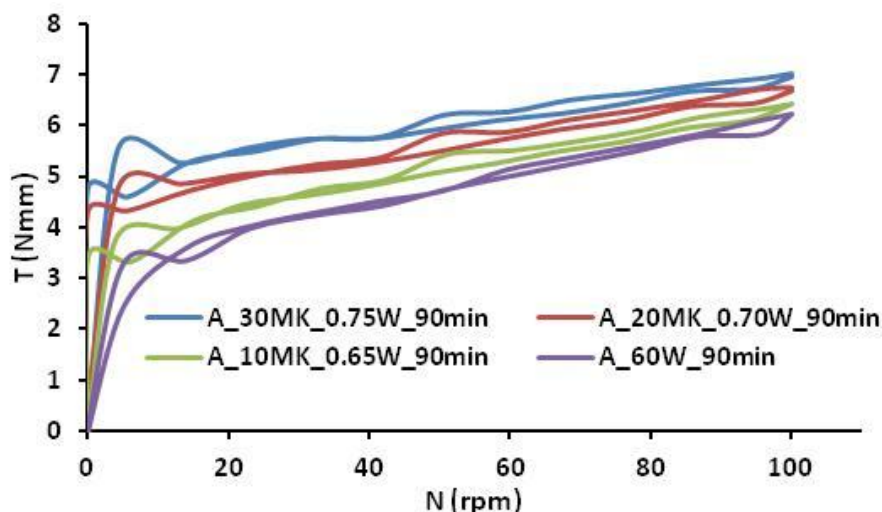


Figura 4.22. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de água de amassadura ajustados.

A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos para os parâmetros h e g , aos 90 minutos, para as argamassas, comparativamente com os apresentados pelos seus betões respetivos. Pode-se verificar que os valores de abaixamento do cone de Abrams) se situam entre 8 e 10 cm, tal como se desejava para os betões resultantes das argamassas com trabalhabilidade ajustada através da alteração do teor de água.

Tabela 4.3. Análise dos valores dos parâmetros h , g e do abaixamento para as argamassas e betões.

Composição Argamassa	h (Nmm min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaixamento (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_10MK_0,65W	0,03	3,85	B_10MK_0,65W	4726	625	8,5
A_20MK_0,70W	0,02	4,75	B_20MK_0,70W	4573	626	9,5
A_30MK_0,75W	0,02	5,06	B_30MK_0,75W	4043	627	9,5

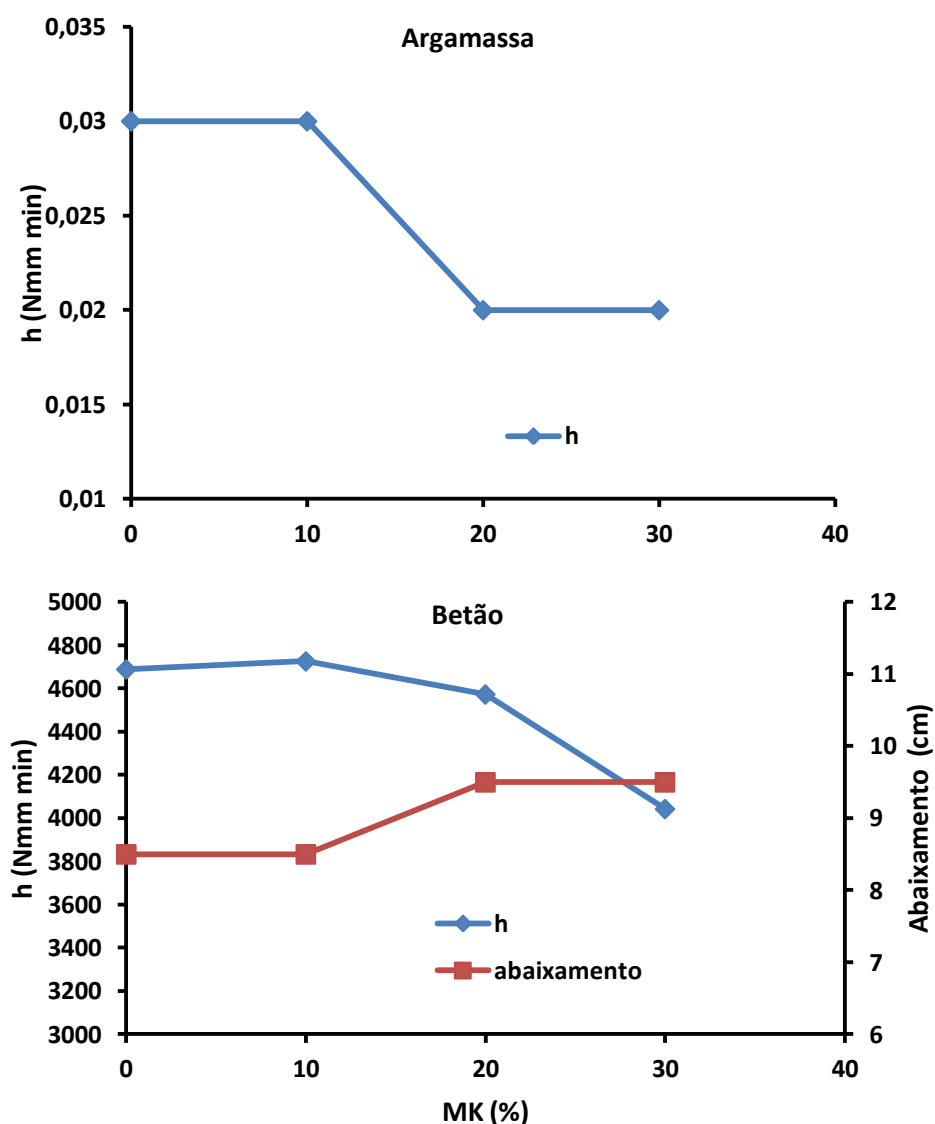


Figura 4.23. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, para as argamassas e betões correspondentes.

A Figura 4.23 compara o comportamento do parâmetro h e do abaixamento para as composições com diferentes teores em metacaulino, nas argamassas e betões correspondentes. É possível verificar que, embora em escalas muito diferentes, a variação de h e do abaixamento, em função das diferentes formulações, é semelhante para as argamassas e respetivos betões. Concretamente, com um aumento da fluidez do sistema, a viscosidade diminui e o abaixamento aumenta, como esperado.

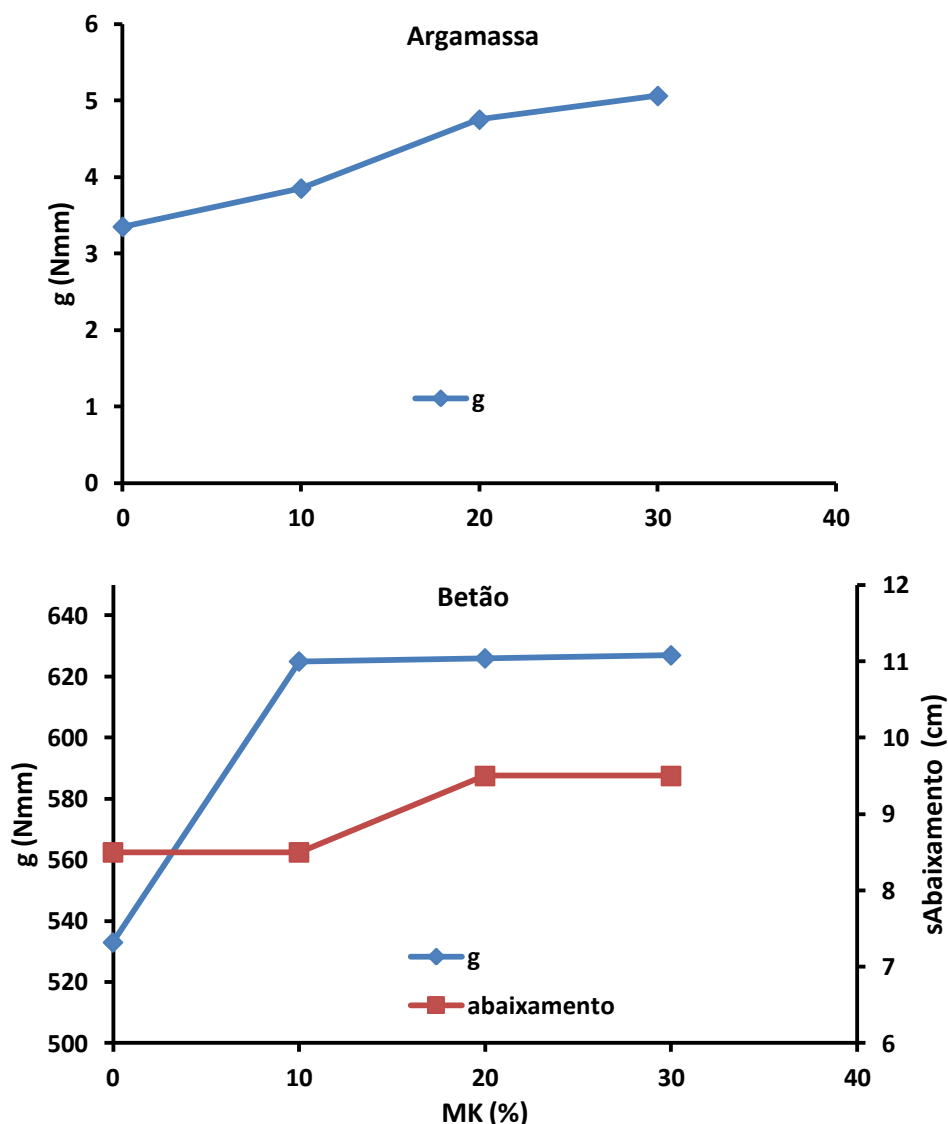


Figura 4.24. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, com o teor de MK, para as argamassas e betões correspondentes.

Em relação à comparação do comportamento do parâmetro g com o abaixamento, para as composições com diferentes teores em metacaulino (Figura 4.24) verifica-se que, embora o abaixamento aumente, a tensão de cedência também aumenta embora o sistema esteja mais fluido. Como as partículas de metacaulino ainda estão muito aglomeradas e, tanto mais quanto maior a quantidade de metacaulino, estas “partículas grandes” ajudam a manter o esqueleto formado pelos aglomerados grossos e, devido a este facto, o valor de g aumenta nas argamassas e nos betões respectivos.

Os valores obtidos reforçam mais uma vez a relação existente entre a reologia da argamassa com a do betão correspondente.

4.1.3.2. Incorporação de diatomite

O ajustamento da trabalhabilidade das argamassas com substituição de cimento por diatomite (0, 3, 5, 8 e 10% em peso) foi também efetuado. A figura 4.25 mostra o comportamento do torque com o tempo de ensaio para a argamassa padrão e as argamassas com diatomite. Aos 90 minutos existe apenas uma pequena diferença entre a argamassa padrão e as argamassas com diatomite, apresentando estas valores menores de torque. Esta variação de torque corresponde a uma diferença também pequena no parâmetro h (Figura 4.26) onde, também as argamassas com diatomite apresentam valores menores.

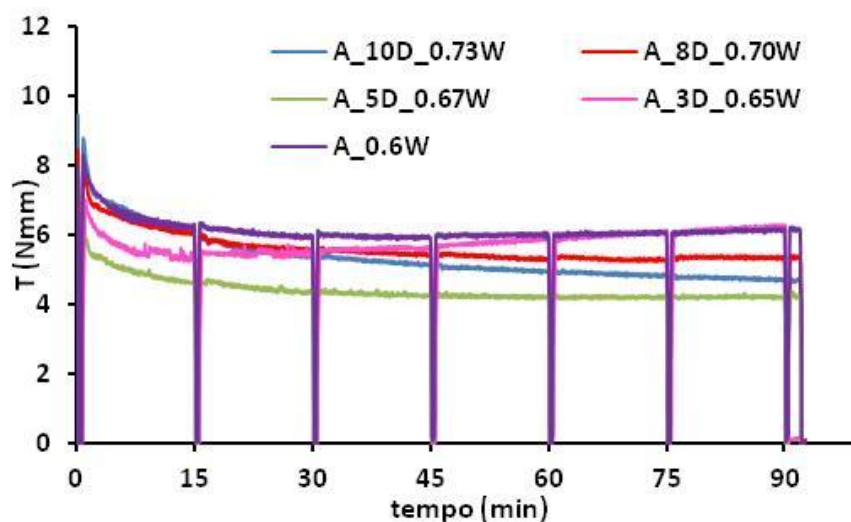


Figura 4.25. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de D e, teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

Relativamente à tensão de cedência, o comportamento das argamassas com o tempo de ensaio é equivalente. Verifica-se uma pequena divergência entre a argamassa padrão e as argamassas com diatomite que, aos 90 minutos, mostram menores valores de g que a padrão (Figura 4.27).

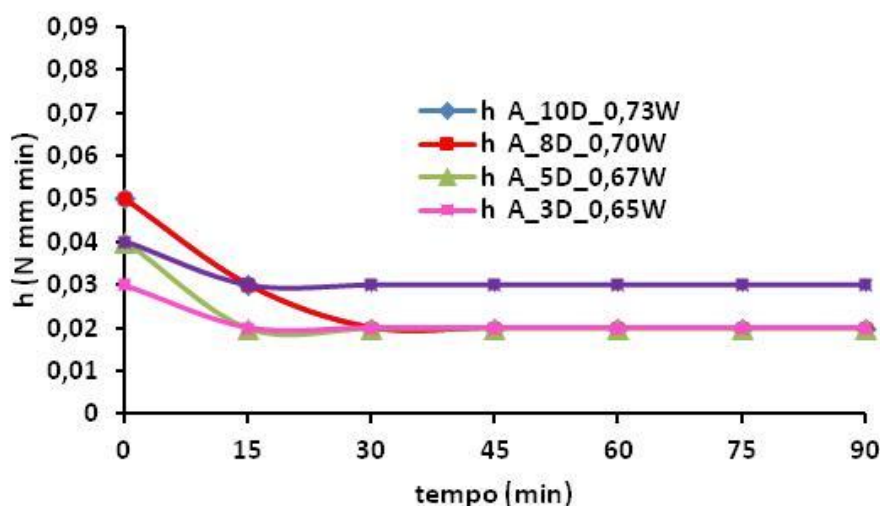


Figura 4.26. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

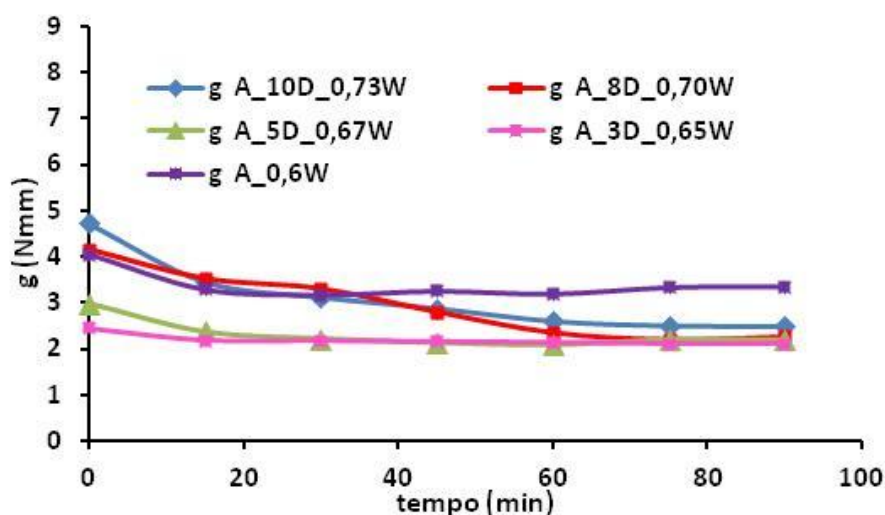


Figura 4.27. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

A Figura 4.28 mostra as curvas de fluxo para estas argamassas aos 90 minutos. As argamassas com diatomite apresentam menor valor de torque que a argamassa padrão e também menor área de histerese. Estas diferenças observadas são aceitáveis e derivam do ajuste na quantidade de água de amassadura efetuado.

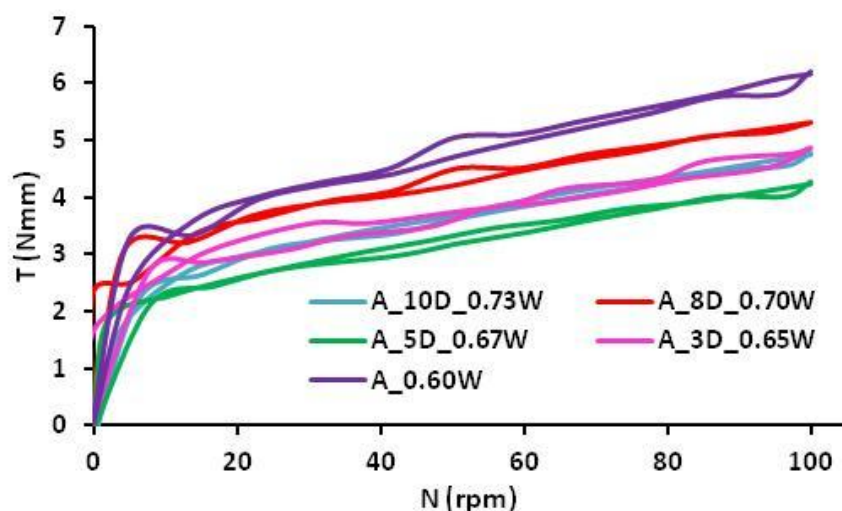


Figura 4.28. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de D (0,3, 5, 8 e 10%) e teores de água de amassadura ajustados.

A comparação entre os parâmetros h e g das argamassas e respectivos betões com o abaixamento de cone de Abrams (abaixamento) pode ser observada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Análise dos valores dos parâmetros h , g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com 0, 3, 5, 8 e 10% de D.

Composição Argamassa	h (Nmm min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaixamento (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_3D_0,65W	0,02	2,10	B_3D_0,65W	4413	634	9,0
A_5D_0,67W	0,02	2,19	B_5D_0,67W	4407	653	9,0
A_8D_0,70W	0,02	2,26	B_8D_0,70W	4399	789	9,0
A_10D_0,73W	0,02	2,49	B_10D_0,73W	4380	772	9,0

Comparando os valores de h e os valores do abaixamento (Figura 4.29), das argamassas e betões correspondentes, é possível verificar que a variação de h e do abaixamento, em função das diferentes formulações, é semelhante para as argamassas e respectivos betões. Concretamente, com um aumento da fluidez do sistema a viscosidade diminui inicialmente com o aumento do abaixamento e, para teores acima de 3% de diatomite, a viscosidade mantém-se constante, para um valor de abaixamento de 9.

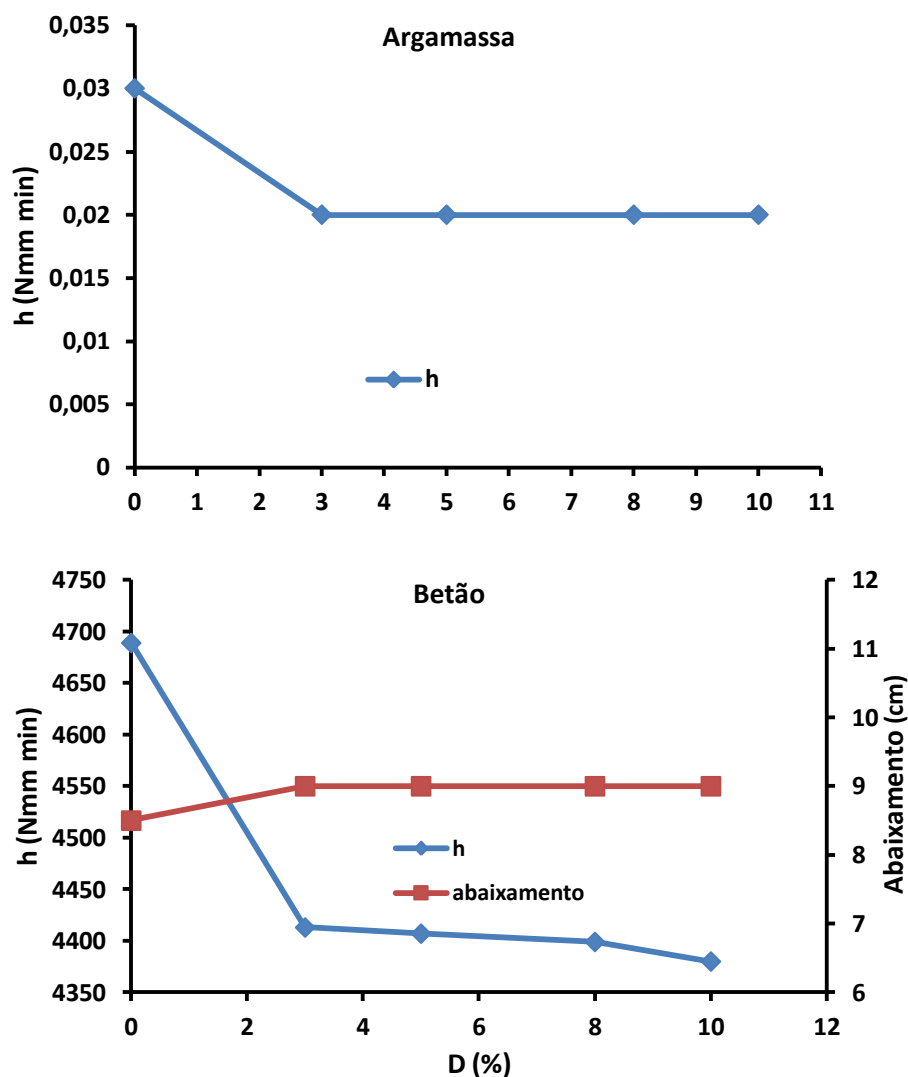


Figura 4.29. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de D , para as argamassas e betões correspondentes.

Em relação à comparação do comportamento do parâmetro g com o abaixamento, para as composições com diferentes teores em diatomite (Figura 4.30), tal como as de metacaulino, verifica-se que a tensão de cedência aumenta com o aumento da quantidade de diatomite. Contudo, este efeito com a diatomite deve-se á sua elevada porosidade. Uma quantidade considerável de água é retirada do sistema para o interior da diatomite, promovendo um aumento da densidade da argamassa do betão, o que provoca o incremento da tensão de cedência [Bentz et al 2012].

Assim, pode-se concluir que se conseguiu ajustar os parâmetros reológicos, das argamassas e betões com diatomite, para os valores pretendidos, tal como no caso do metacaulino, através do teor de água de amassadura.

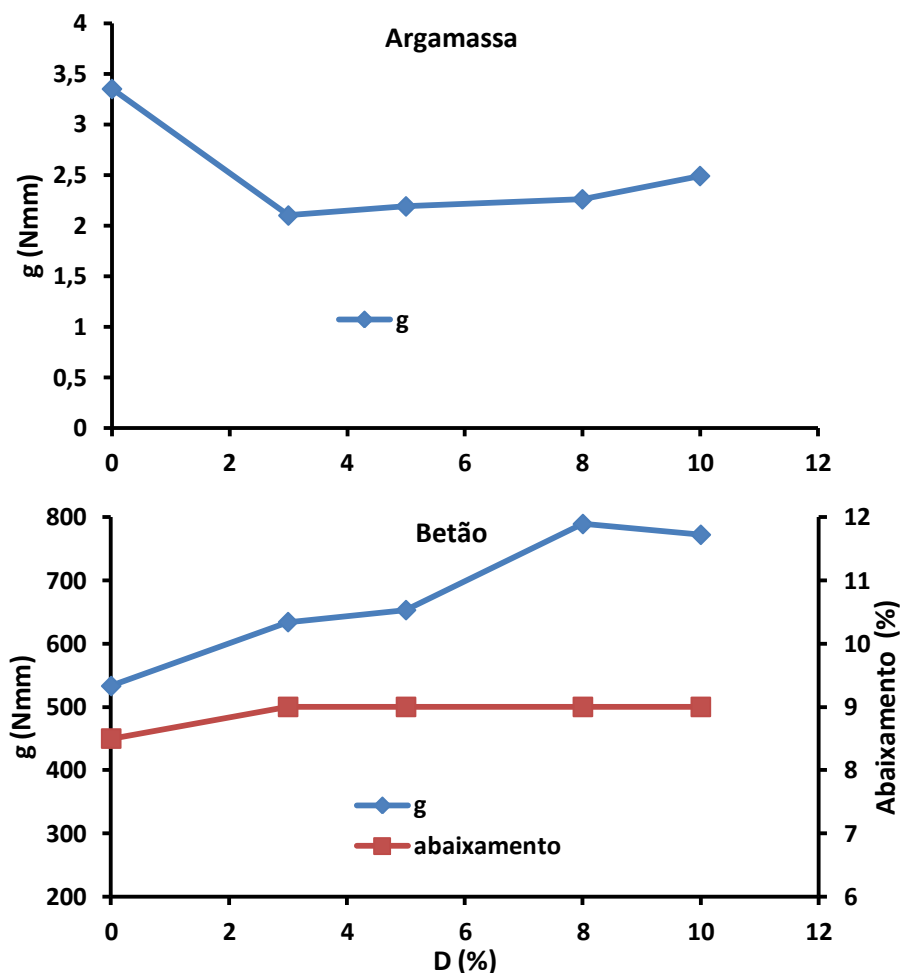


Figura 4.30. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de D , para as argamassas e betões correspondentes.

4.1.3.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite

Para além das composições com substituição do cimento por metacaulino ou diatomite, decidiu-se produzir algumas composições ternárias, ou seja, efetuou-se a substituição simultânea do cimento por metacaulino e diatomite. Estas composições contêm um teor de diatomite constante (3%) sendo o metacaulino introduzido em teores de 5, 10, 15 e 20%. A opção pela análise destas formulações deve-se ao facto da diatomite ter uma porosidade muito elevada, considerando-se que poderia comportar-se como um

reservatório de água, favorecendo a hidratação do cimento e as reações pozolânicas do metacaulino.

Tal como para as composições apenas com metacaulino ou diatomite, efetuou-se um ajustamento da trabalhabilidade destas formulações através da alteração do teor de água de amassadura. O resultado desse ajustamento pode ser observado na Figura 4.31, que mostra o comportamento do torque com o tempo de ensaio para as diversas composições, verificando-se a aproximação do comportamento das composições ternárias ao comportamento da argamassa padrão.

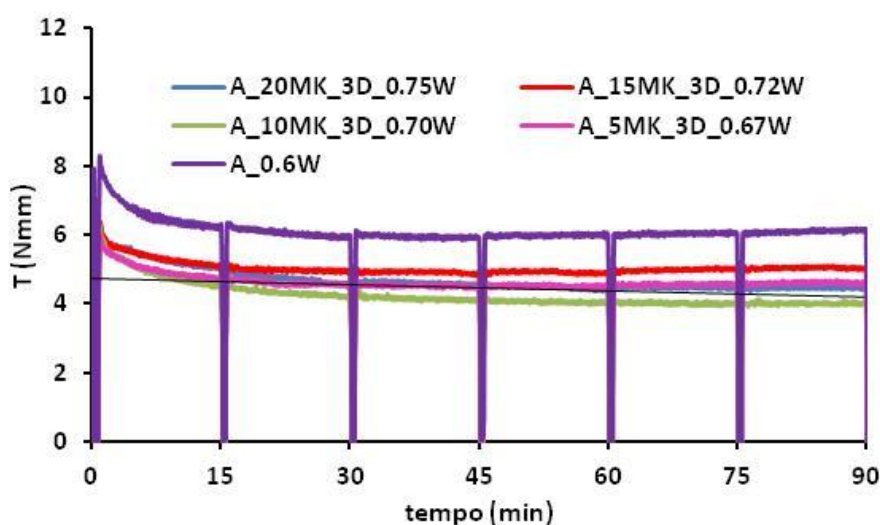


Figura 4.31. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK e 3% de D e, teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

Relativamente à viscosidade e à tensão de cedência, essa aproximação também é visível nas Figuras 3.32 e 3.33, onde se pode analisar o comportamento dos parâmetros h e g ao longo do tempo de ensaio.

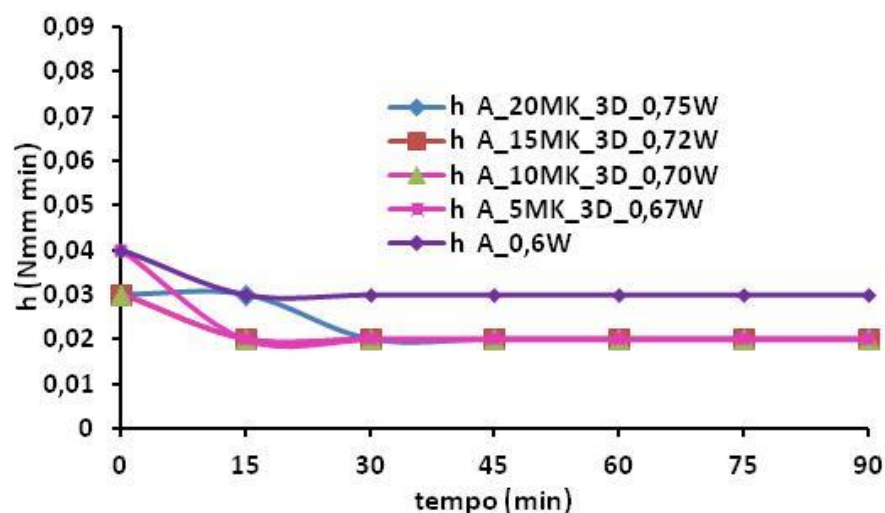


Figura 4.32. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

A Figura 4.34 apresenta as curvas de fluxo das composições ternárias comparativamente com a composição padrão. As composições ternárias mostram valores de torque menores que a padrão mas com uma área de histerese equivalente à da argamassa padrão.

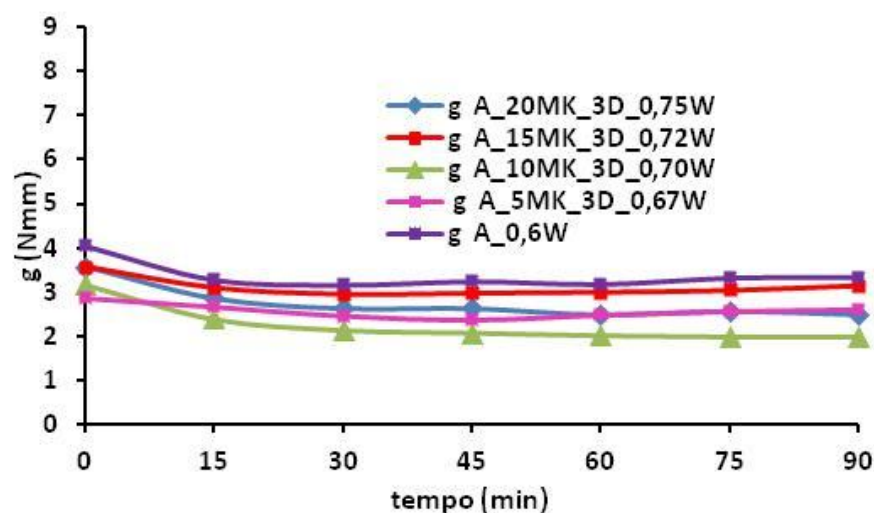


Figura 4.33. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de água de amassadura ajustados, durante os 90 minutos de teste.

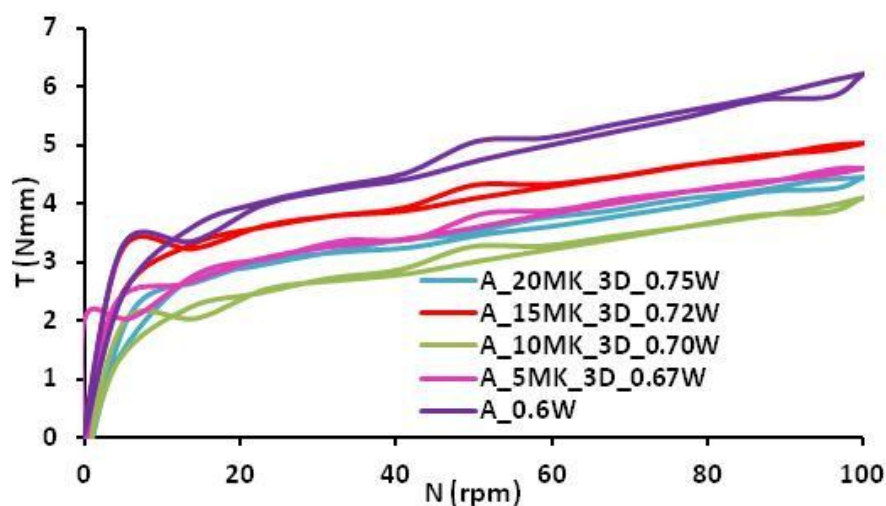


Figura 4.34. Comportamento das curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de água de amassadura ajustados.

A Tabela 4.5 mostra os valores de h e g nas argamassas e nos betões relativamente aos respetivos padrões.

Tabela 4.5. Análise dos valores dos parâmetros h , g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com 0, 3, 5, 8 e 10% de MK e 3% de D.

Composição Argamassa	h (Nmm min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaix. (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_5MK_3D_0,67W	0,02	2,61	B_5MK_3D_0,67W	2096	206	9
A_10MK_3D_0,70W	0,02	2,00	B_10MK_3D_0,70W	2073	337	9
A_15MK_3D_0,72W	0,02	3,15	B_15MK_3D_0,72W	1841	636	9
A_20MK_3D_0,75W	0,02	3,49	B_20MK_3D_0,75W	1971	650	9

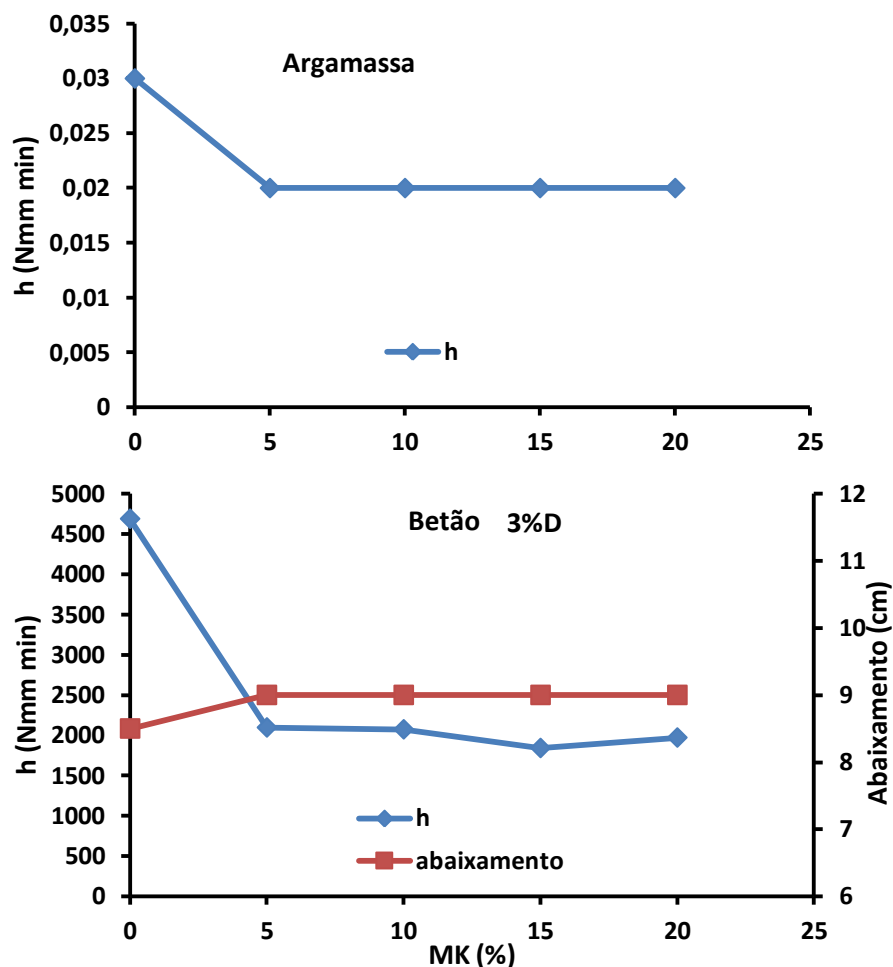


Figura 4.35. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função do teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.

O comportamento de h e g para estas argamassas e betões e, também para o abaixamento (Figuras 4.35 e 4.36), é equivalente ao observado nas formulações apenas com metacaulino ou diatomite. Em todas as formulações estudadas, o h acompanha o comportamento do abaixamento e g apresenta valores sempre crescentes com o aumento do teor em material pozzolânico, independente do valor do abaixamento. É possível considerar que o abaixamento do cone de Abrams é mais influenciado pela viscosidade do que pela tensão de cedência.

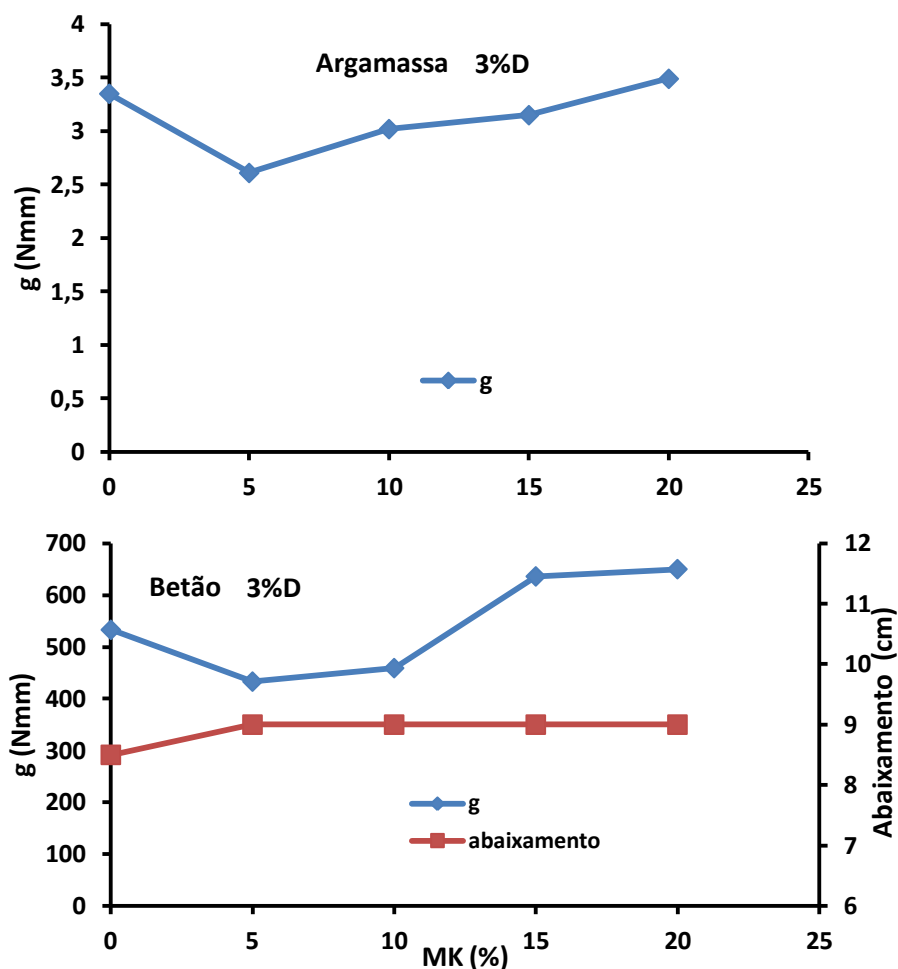


Figura 4.36. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função do teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.

Em síntese, este estudo de correlação do comportamento reológico entre argamassas e betões correspondentes partiu de uma argamassa padrão com relações cimento/areia e água/cimento iguais à apresentada pelo betão padrão respectivo, de modo a que este tivesse uma trabalhabilidade entre 8 e 10 cm de abaixamento do cone de Abrams. A substituição parcial do cimento por dois materiais pozolânicos com características físicas e químicas diferentes veio modificar a fluidez das argamassas e respectivos betões no sentido de um espessamento com notória quebra de trabalhabilidade. Verificou-se por reometria que através da alteração do teor de água de amassadura se consegue ajustar o comportamento reológico e garantir betões correspondentes dentro do intervalo de trabalhabilidade desejado, mesmo quando possa existir, como observado, uma diferença (até 2 Nmm) entre os torques medidos da argamassa padrão relativamente aos das argamassas com pozolanas. Aparentemente, usando a água como corrector de

trabalhabilidade, a viscosidade é a propriedade que tem maior influência sobre o abaixamento comparativamente à tensão de cedência. Também se pode considerar que existe uma boa relação entre o comportamento reológico das argamassas e os seus betões correspondentes, nomeadamente no que se refere ao comportamento da viscosidade e da tensão de cedência. Poder-se-ia afirmar que, neste caso, o comportamento reológico do betão é condicionado pelo comportamento da argamassa que lhe serve de base.

4.1.4. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o comportamento reológico de argamassas e betões com pozolanas.

Uma das características dos materiais pozolânicos é a sua finura que lhes garante uma elevada reatividade e acelera a reação com o Ca(OH)_2 proveniente da hidratação do cimento. Podem também ter uma ação como “filler”, preenchendo a porosidade mais fina e contribuindo para a compacidade das argamassas e betões. No entanto, como já foi referido anteriormente, as partículas finas, com elevada energia superficial, têm tendência a aglomerar promovendo a criação de “partículas” bastante maiores, tal como se pode observar na Figura 4.37. É bastante evidente a aglomeração de ambos os materiais, embora o metacaulino, com área superficial muito superior à diatomite, mostre uma maior aglomeração, enquanto na diatomite os aglomerados parecem mais desligados.

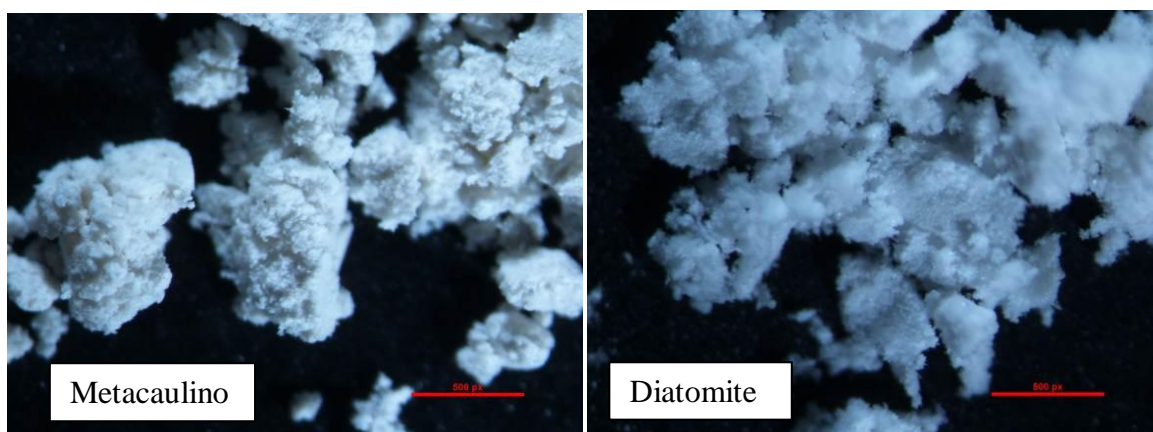


Figura 4.37. Imagem dos aglomerados de metacaulino e diatomite observadas por lupa (ampliadas 500x).

Na determinação da curva granulométrica de materiais muito finos, adiciona-se um agente desfloculante à suspensão do material a analisar e sujeita-se durante algum tempo a ultrassons, para ajudar a amostra a dispersar. A Figura 4.38 mostra a diferença da distribuição de tamanhos de “partículas” de metacaulino com e sem agente desfloculante. É evidente o efeito de dispersão pelo uso do agente desfloculante, deslocando a curva para a zona dos tamanhos mais pequenos. Relativamente à diatomite, a presença do agente desfloculante não tem qualquer efeito sobre a distribuição de tamanhos de partículas (Figura 4.39) pois as partículas de diatomite são facilmente desaglomeradas num banho de ultrassons.

Este efeito de aglomeração pode ter consequências negativas porque, por um lado, diminui a velocidade de reação das pozolanas, na medida em que partículas maiores são menos reativas e, por outro lado, impede também a sua ação como “filler”.

Torna-se assim importante para melhor compreender o efeito do agente redutor de água de amassadura como controlador da trabalhabilidade das argamassas e betões que, em primeiro lugar, se aborde o efeito deste adjuvante na dispersão das pozolanas.

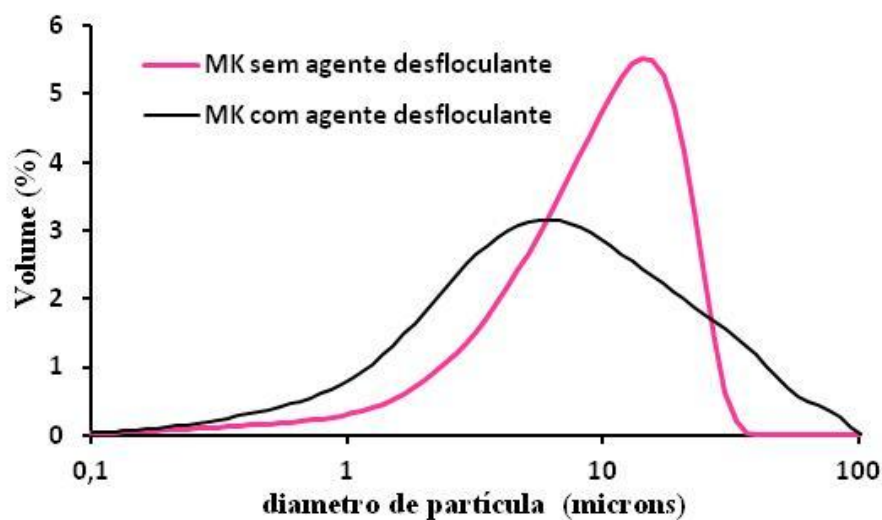


Figura 4.38. Análise da distribuição dos tamanhos de partículas de MK com e sem agente desfloculante (Coulter).

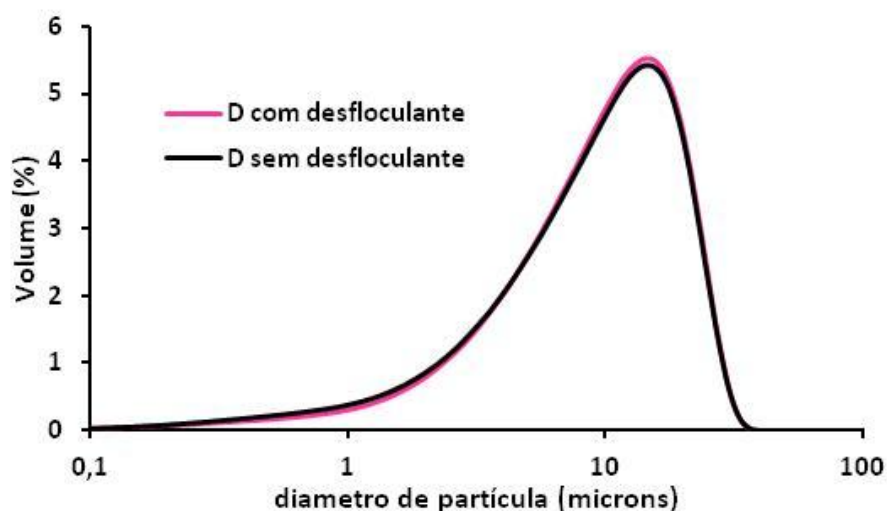


Figura 4.39. Análise da distribuição dos tamanhos de partículas de D com e sem agente desfloculante (Coulter).

4.1.4.1 Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o cimento e as pozolanas

A utilização de agentes redutores de água de amassadura, normalmente denominados superplastificantes (SP) pode ter um efeito de dispersão sobre as partículas aglomeradas. Para comprovar este efeito foram produzidas pastas de cimento de metacaulino e de diatomite para se estudar o efeito da utilização de diferentes teores de SP sobre esses materiais. Considera-se como pasta a mistura com água do cimento ou do material pozolânico.

O comportamento reológico da pasta de cimento, com uma relação a/c de 0,35, está representado nas Figuras 4.40 e 4.41, onde se pode observar o efeito da utilização de superplastificante sobre o torque e sobre a área de histerese.

Pode-se comprovar que com o uso do agente redutor de água de amassadura, a fluidez do sistema aumenta drasticamente, com conseqüente diminuição do torque. Por outro lado, quando se observam as curvas de fluxo, aos 90 minutos, confirma-se o poder desaglomerante do superplastificante. A área de histerese, presente na pasta de cimento sem agente redutor de água de amassadura, desaparece por completo, quando se adiciona 0,5% deste adjuvante, devido à destruição dos aglomerados de cimento.

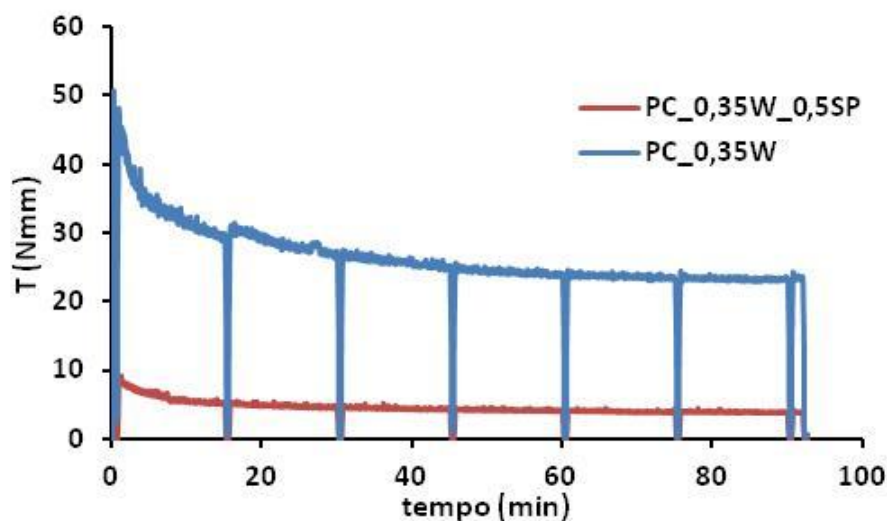


Figura 4.40. Variação dos valores do torque, ao longo do tempo de ensaio, para uma pasta de cimento sem SP e com 0.5% de SP.

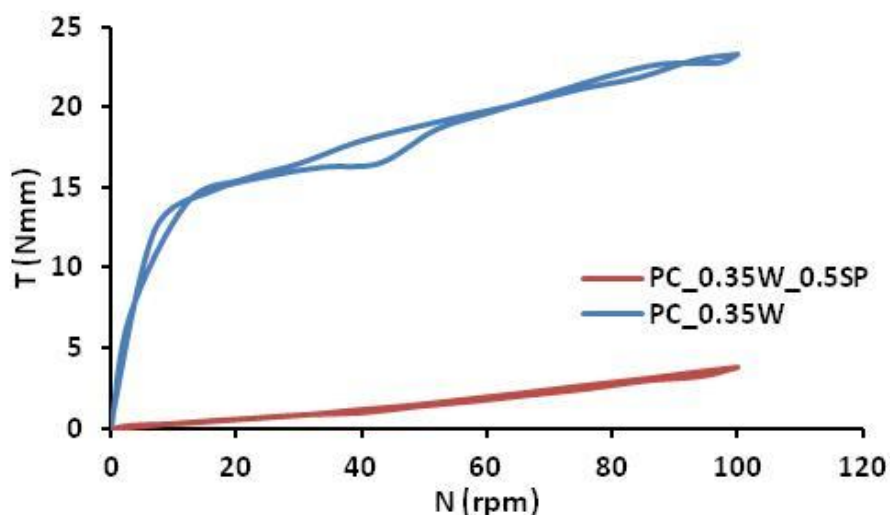


Figura 4.41. Curvas de fluxo aos 90 minutos para uma pasta de cimento sem SP e com 0.5% de SP.

A pasta de metacaulino foi produzida com uma relação a/MK de 0,75 e, como se pode verificar pelos valores de torque na Figura 4.42 quando comparada com a Figura 4.40, a pasta de metacaulino é mais fluida que a pasta de cimento. No entanto, devido à elevada finura das partículas de metacaulino, necessita de maiores quantidades de superplastificante para se conseguir uma desaglomeração completa. A análise das curvas de fluxo (figura 4.43), mostra que é necessário 1,5% de superplastificante para eliminar a área de histerese, ou seja, para que o material se disperse totalmente.

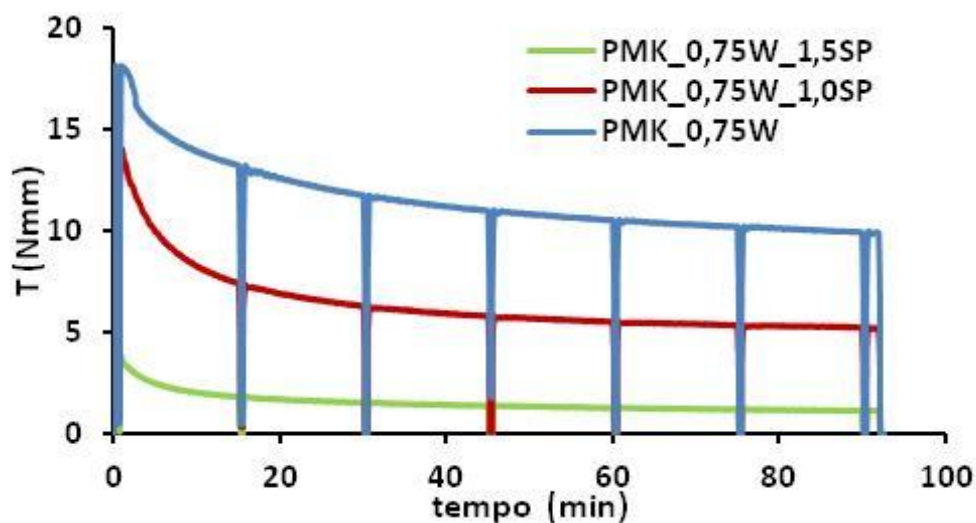


Figura 4.42. Variação dos valores do torque, ao longo do tempo de ensaio, para uma pasta de MK sem SP e com 1 e 1,5% de SP.

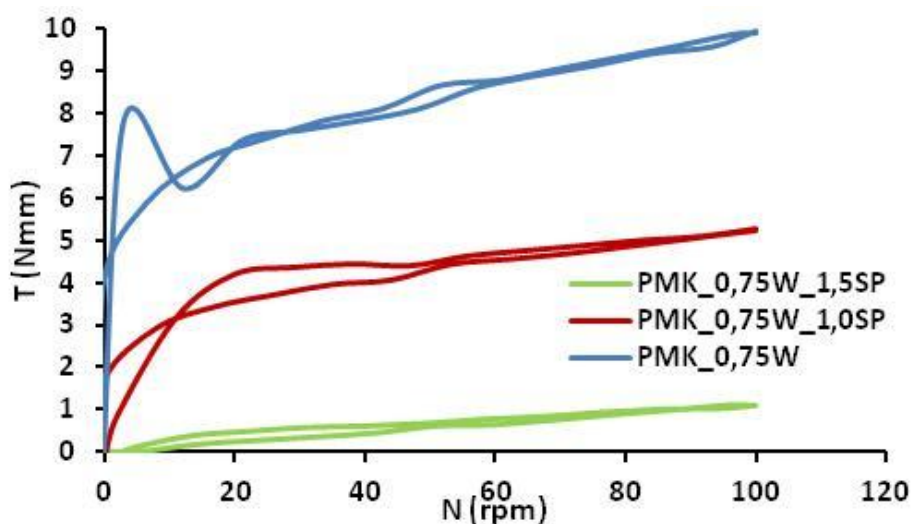


Figura 4.43. Curvas de fluxo aos 90 minutos para uma pasta de MK sem SP e com 1 e 1,5% de SP.

Relativamente à pasta de diatomite, a sua preparação requereu uma relação a/D ainda maior (1,5) devido à sua porosidade. O comportamento do torque com o tempo de ensaio é bastante diferente do observado na pasta de cimento ou de metacaulino. Inicialmente, o torque apresenta valores muito elevados, que vão diminuindo rapidamente durante os primeiros 15 minutos de ensaio. Durante a mistura da pasta a diatomite rapidamente absorve grande parte da água do sistema e, isso está patente no início do teste, onde os valores do torque são muito elevados. Durante o ensaio, o agente redutor de água

de amassadura vai ligar-se à superfície das partículas de diatomite e libertar a água que aí se encontra adsorvida. A água libertada vai então contribuir para a lubrificação da pasta com a consequente diminuição do valor do torque (Figura 4.44). Relativamente às curvas de fluxo com diferentes teores de superplastificante, verifica-se que são necessárias quantidades de superplastificante bastante elevadas (2,5%) para que se consiga eliminar a área de histerese (Figura 4.45).

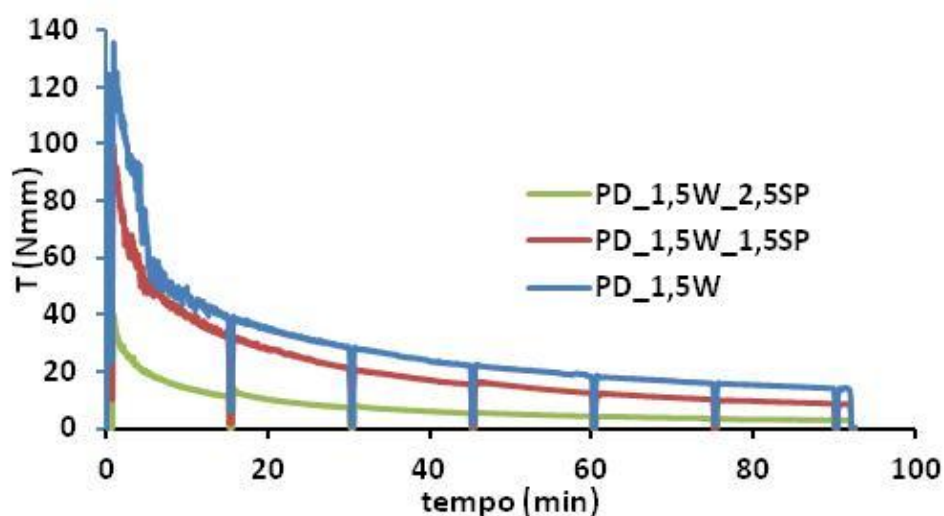


Figura 4.44. Variação dos valores do torque, ao longo do tempo de ensaio, para uma pasta de D sem SP e com 1,5 e 2,5% de SP.

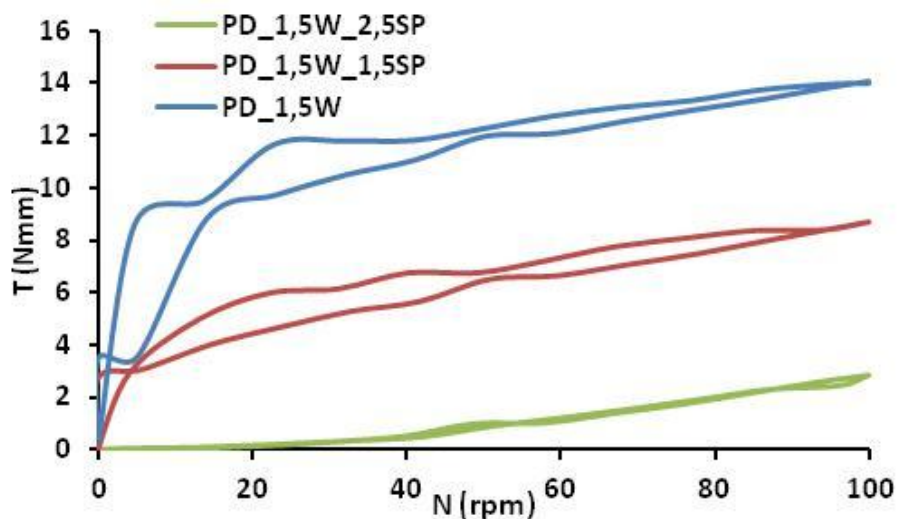


Figura 4.45. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para uma pasta de D sem SP e com 1,5 e 2,5% de SP.

Os agentes redutores de água de amassadura ao ligarem-se à superfície das partículas, libertando água para a lubrificação das argamassas, conseguem aumentar a fluidez dos sistemas. Sob este ponto de vista, podem servir para o ajuste de trabalhabilidade, que se procura neste trabalho, para as argamassas e betões (8-10 cm de abaixamento) com diferentes teores das diferentes pozolanas.

4.1.4.2. Incorporação de metacaulino

A Figura 4.46 mostra o comportamento do valor do torque, com o tempo de ensaio, para formulações de argamassa com diferentes teores de substituição de cimento por metacaulino, ajustadas pelo teor de agente redutor de água (SP) de forma a se verificar uma aproximação ao comportamento da argamassa padrão. A quantidade de água de amassadura é mantida constante e igual á usada na argamassa padrão ($a/l=0,6$). As argamassas com 10 e 20% de metacaulino, com teores de 0,1 e 0,15% de SP, respetivamente, apresentam um comportamento bastante idêntico ao da argamassa padrão. No caso da composição com 30% de metacaulino é preciso usar 0,3% de superplastificante para também se conseguir essa aproximação, enquanto que, se usar apenas 0,2% de SP a curva dos valores do torque fica bastante mais elevada que a da argamassa padrão.

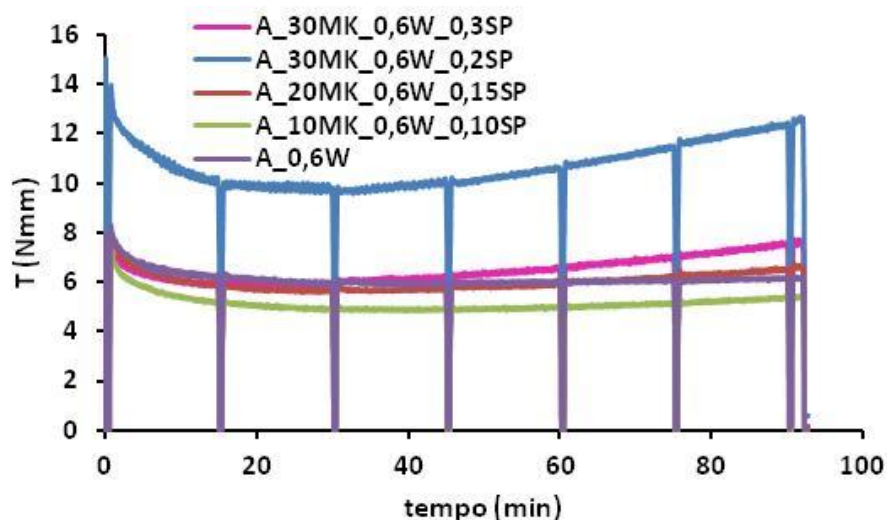


Figura 4.46. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

O comportamento dos parâmetros h e g pode ser observado nas figuras 4.47 e 4.48. Tal como se verificou relativamente ao comportamento dos valores do torque, os valores de h e de g para as composições com 10, 20 e 30% de metacaulino, com teores de 0,1, 0,15 e 0,3% de superplastificante, respetivamente, apresentam-se próximos dos valores de h e g para a argamassa padrão. A composição com 30% de metacaulino e 0,2% de superplastificante apresenta valores mais elevados relativamente à argamassa padrão. As áreas de histerese, presentes na Figura 4.49, mostram o mesmo comportamento, com a composição com 30% de metacaulino e 0,2% de superplastificante com valores de torque superiores e maior área de histerese, quando comparada com as outras formulações que mostram valores de torque e áreas de histerese bastante equivalentes. Como existe uma restrição imposta pelo intervalo de trabalhabilidade, a quantidade de superplastificante necessária para colocar cada argamassa dentro desse intervalo não é suficiente para separar todas as partículas e, por isso, a área de histerese não é totalmente eliminada em todas as formulações.

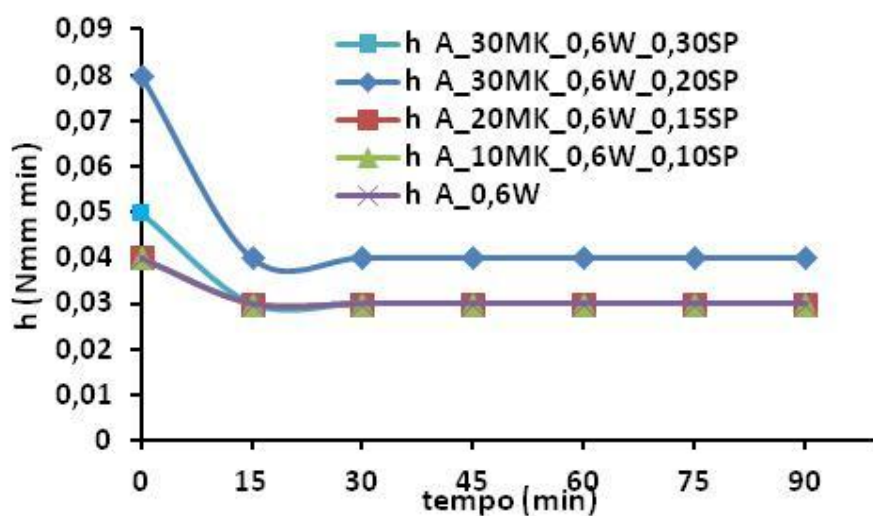


Figura 4.47. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

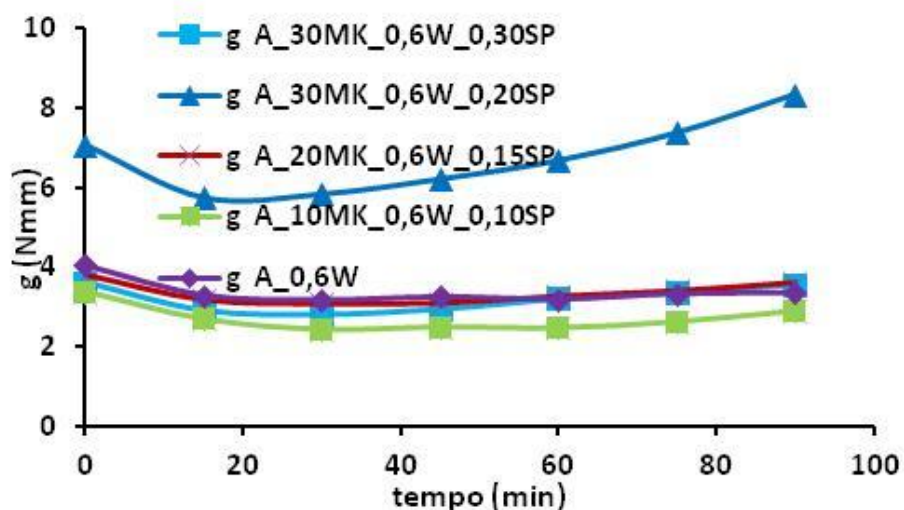


Figura 4.48. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

A análise da Tabela 4.6 mostra que uma das composições não se encontra dentro do intervalo de trabalhabilidade recomendado. Embora essa composição (30%MK e 0,3% SP) esteja ajustada à curva da argamassa padrão, quando é transposta para o betão, mostra um abaixamento superior (15 cm), ou seja, está muito mais fluida do que o pretendido. A composição com 30% de metacaulino e 0,2% de superplastificante, que mostrava valores de torque, viscosidade e tensão de cedência muito superiores à amostra padrão, apresenta a trabalhabilidade dentro do intervalo pretendido.

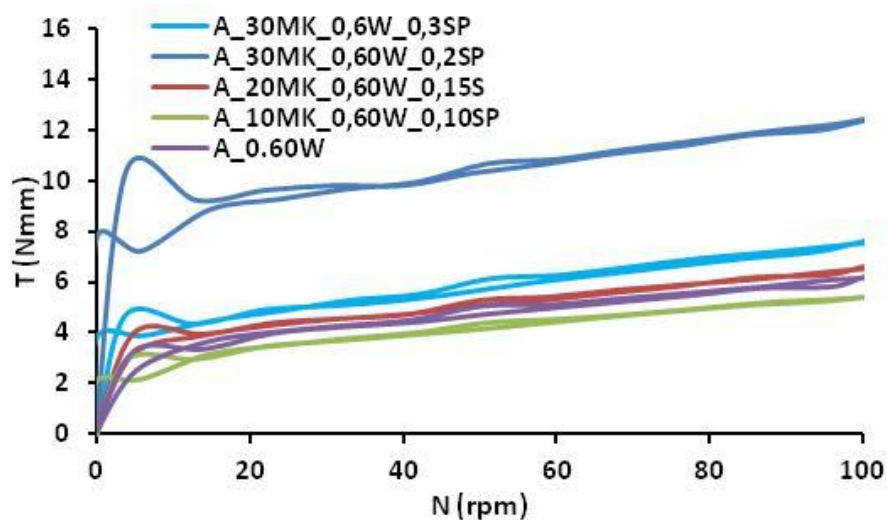


Figura 4.49. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, mantendo a água de amassadura constante.

Tabela 4.6. Valores dos parâmetros h, g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com valores diferentes de MK e de SP, mantendo constante a água de amassadura.

Composição Argamassa	h (Nmm min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaix. (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_10MK_0,60W_0,10SP	0,03	2,89	B_10MK_0,60W_0,10SP	4549	527	9
A_20MK_0,60W_0,15SP	0,03	3,61	B_20MK_0,60W_0,15SP	4648	580	8,5
A_30MK_0,60W_0,2SP	0,04	8,35	B_30MK_0,60W_0,2SP	5001	533	8,5
A_30MK_0,60W_0,3SP	0,03	3,56	B_30MK_0,60W_0,3SP	6675	288	15

Através da utilização do agente redutor de água de amassadura, em composições com elevados teores de materiais finos, o ajustamento a uma determinada curva reológica só é possível até um determinado teor de partículas finas (pozolana). Para teores muito elevados de materiais finos (30% MK), a ação conjunta do efeito moente dos agregados grossos no betão e do uso de elevadas quantidades de superplastificante leva a uma destruição extensiva dos aglomerados, com consequente aumento do teor real de finos. Este aumento substancial de material fino faz com que o teor de agregados grossos e areia não seja suficiente para suportarem a estrutura, verificando-se a cedência do betão, cujo abaixamento ultrapassa o valor limite de 10 cm, pretendido para a trabalhabilidade.

Comparando o comportamento da viscosidade e da tensão de cedência das argamassas e betões com o comportamento do abaixamento (Figuras 4.50 e 4.51), verifica-se que na argamassa os parâmetros h e g, para 30% de metacaulino e 0,2% de superplastificante, mostram um aumento significativo que se deve ao desvio relativamente ao comportamento reológico da argamassa padrão.

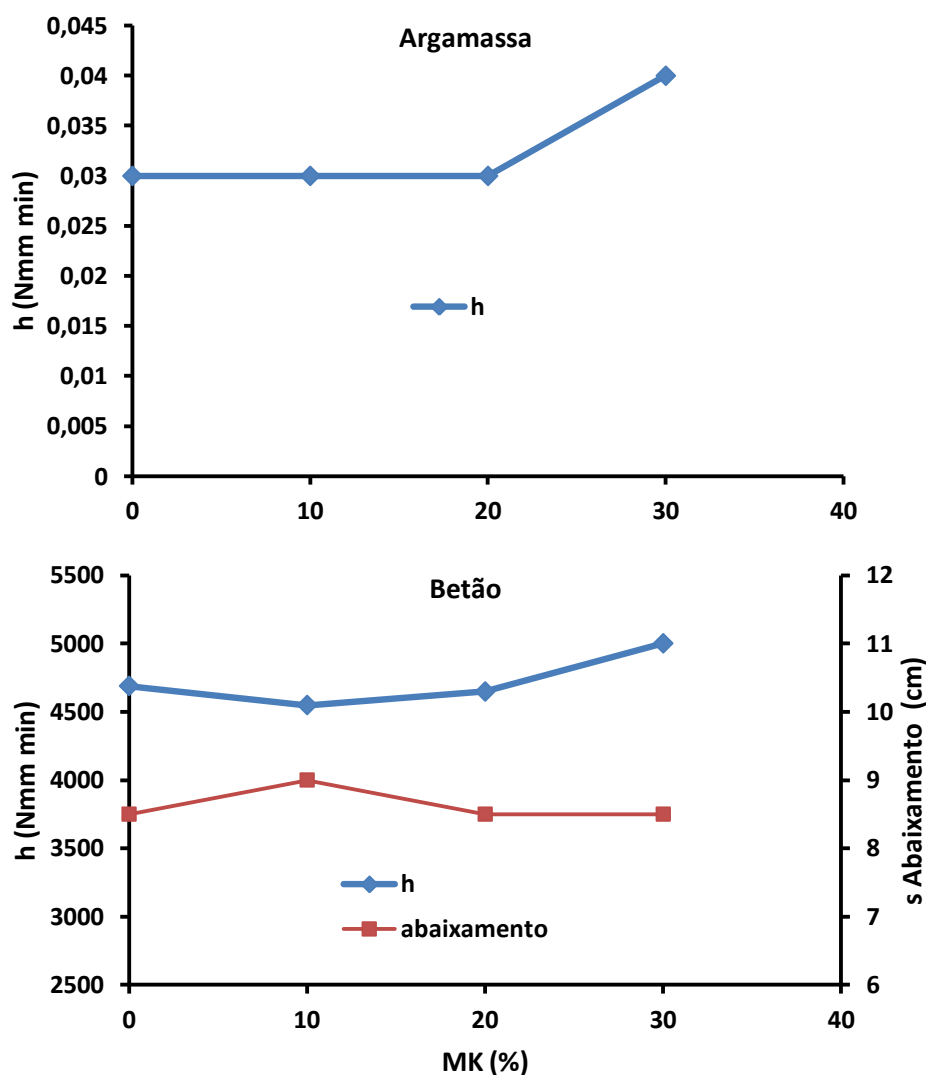


Figura 4.50. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, para as argamassas com SP e betões correspondentes.

Relativamente aos betões, enquanto a viscosidade mostra um aumento com o aumento do teor em metacaulino, principalmente para os teores mais elevados, verifica-se tendência para a tensão de cedência (g) diminuir para os teores elevados de metacaulino, especialmente para a formulação com 30% de metacaulino. Este efeito é provocado pelo efeito moente dos agregados grossos durante a mistura do betão, que para elevados teores de material fino é mais eficaz, auxiliando na desaglomeração das partículas finas que facilmente fluem sob o peso do betão.

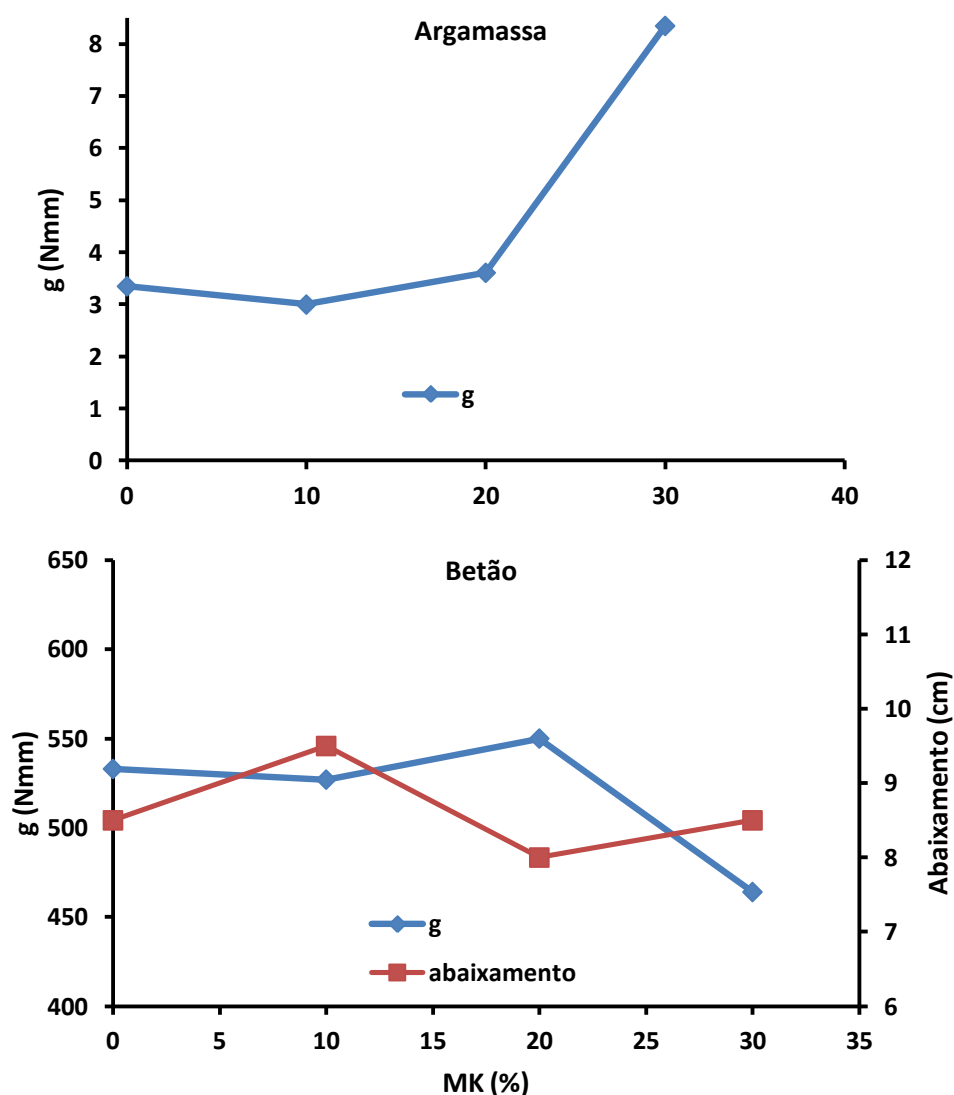


Figura 4.51. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, para as argamassas com SP e betões correspondentes.

Até 20% de metacaulino, as argamassas durante os 90 minutos de teste, com uma rotação de 100 rpm, conseguem atingir um grau de desaglomeração idêntico ao da argamassa padrão, que garante um betão dentro do intervalo de trabalhabilidade desejado embora, no betão, o grau de desaglomeração seja sempre maior devido à ação moente dos agregados grossos. Para teores de metacaulino muito elevados, nas argamassas não é possível o ajuste à argamassa padrão. Efectuou-se um ensaio reométrico para a argamassa com 30% de metacaulino e 0,2% de superplastificante com velocidade de rotação mais elevada (180 rpm) (Figura 4.52), onde se verificou uma diminuição dos valores do torque embora a curva se mantenha afastada da curva de torque da argamassa padrão.

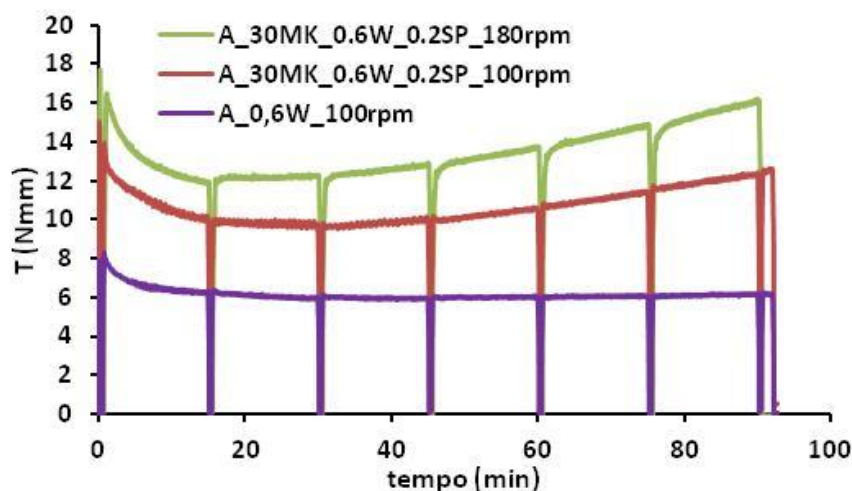


Figura 4.52. Variação do valor do torque, para a argamassa com 30% de MK e 0,2% de SP para duas velocidades de rotação diferentes comparativamente com a argamassa padrão.

Relativamente ao betão, a massa dos agregados em movimento, durante a mistura, desaglomera e homogeneiza a argamassa mais eficazmente que um misturador convencional de laboratório [Williams et al 1999, Powers 1968]. Este efeito da acção moente dos agregados grossos durante a mistura do betão, é mais evidente para teores de material fino elevados, auxiliando na desaglomeração das partículas finas que facilmente fluem sob o peso do betão e consequentemente obtem-se uma menor tensão de cedência

4.1.4.3. Incorporação de diatomite

A utilização do agente redutor de água de amassadura para ajuste de trabalhabilidade nas argamassas com diatomite é mais difícil, tal como se pode observar pela Figura 4.53. Apenas as formulações com 3 e 5% de diatomite, mostram uma aproximação aceitável dos valores do torque, relativamente à amostra padrão, verificando-se um afastamento considerável para os teores mais elevado (8 e 10%). Estes afastamentos não são tão visíveis no comportamento de h com o tempo de ensaio, como se pode ver na Figura 4.54.

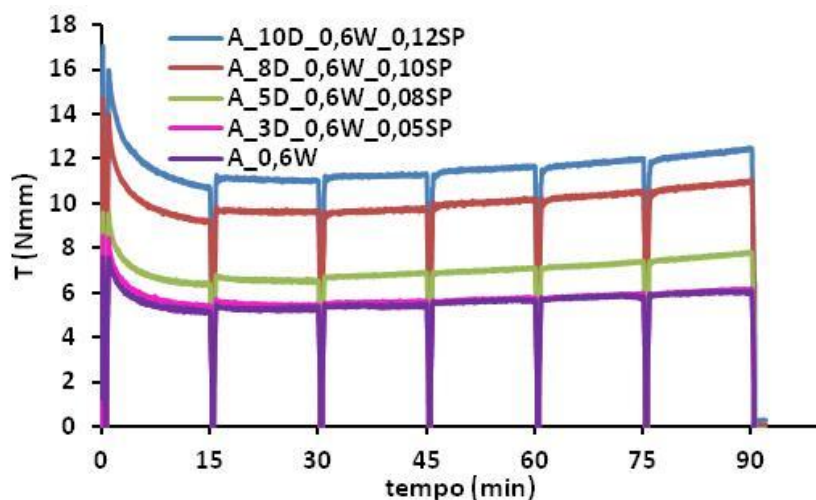


Figura 4.53. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de diatomite e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

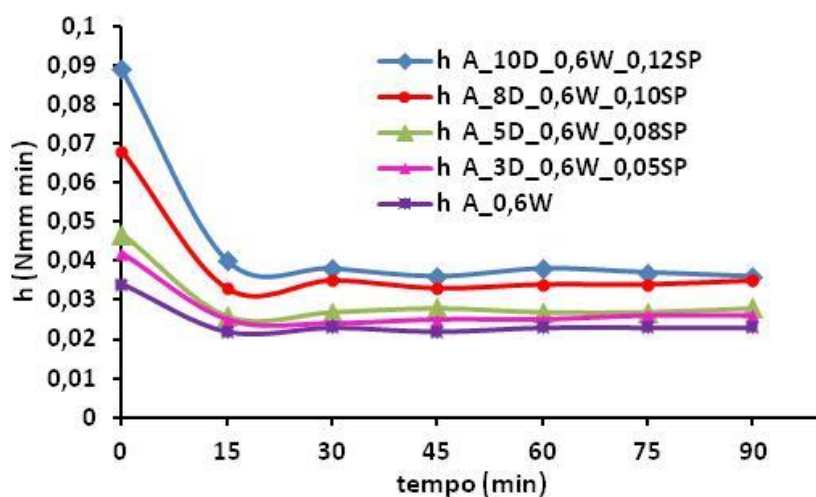


Figura 4.54. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

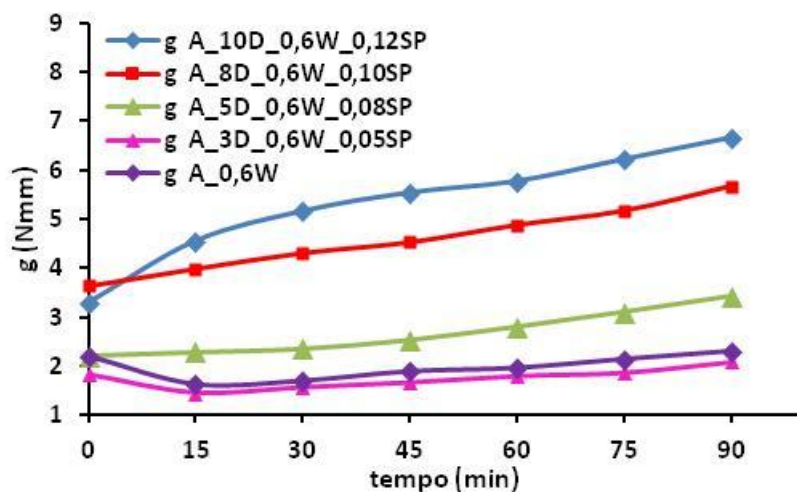


Figura 4.55. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

Aos 90 minutos de ensaio, as diferentes formulações encontram-se bastantes próximas. No entanto, relativamente ao parâmetro g , as composições com 8 e 10% de diatomite voltam a destacar-se das outras composições (Figura 4.55). O comportamento das curvas de fluxo em termos de áreas de histerese, patente na Figura 4.56 para todas as composições, aparenta estar dentro de um limite aceitável.

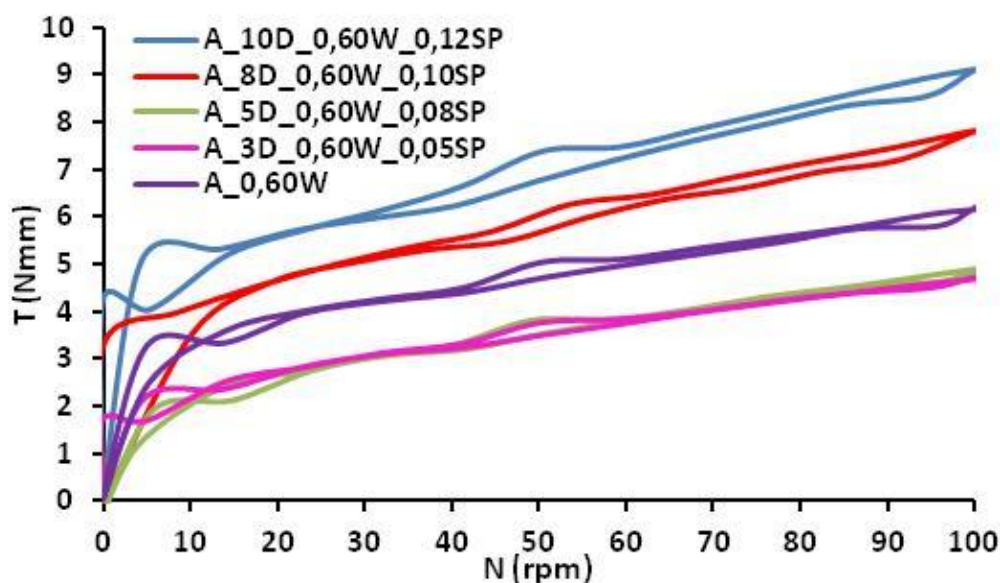


Figura 4.56. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK e teores de SP ajustados, mantendo a água de amassadura constante.

Tabela 4.7. Valores dos parâmetros h , g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com valores diferentes de D e de SP , mantendo constante a água de amassadura.

Composição argamassa	h (Nmm/min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaix. (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_3D_0,60W_0,05SP	0,03	2,08	B_3D_0,60W_0,05SP	4711	480	9
A_5D_0,60W_0,08SP	0,03	3,42	B_5D_0,60W_0,08SP	4902	470	9
A_8D_0,60W_0,10SP	0,04	5,67	B_8D_0,60W_0,10SP	4994	457	9
A_10D_0,60W_0,12SP	0,04	6,66	B_10D_0,60W_0,12SP	6921	380	9
A_10D_0,60W_0,15SP	0,03	5,88	B_10D_0,60W_0,15SP	4649	131	12,5

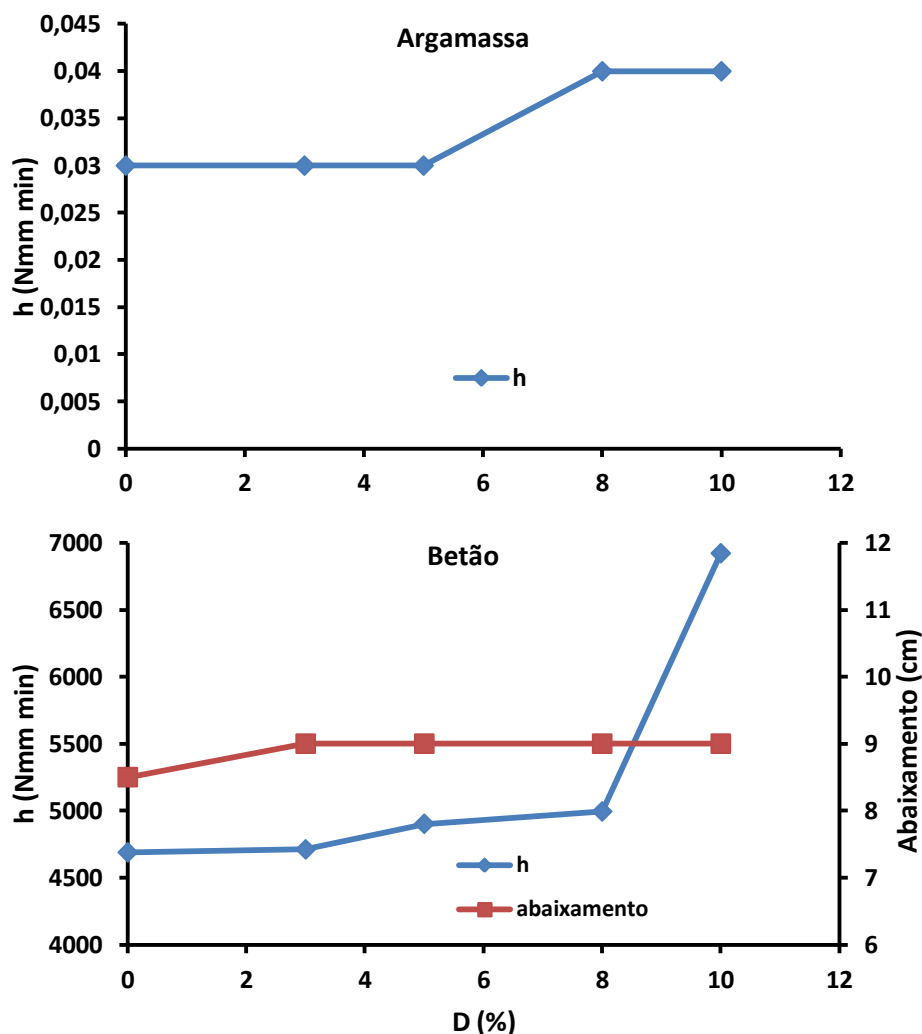


Figura 4.57. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de D , para as argamassas com SP e betões correspondentes.

No entanto, pela Tabela 4.7, que mostra a comparação entre os valores de h e g para as argamassas e betões bem como os valores de trabalhabilidade (abaixamento), verifica-se uma repetição do comportamento já observado na análise do papel do metacaulino. Tanto as argamassas como os betões apresentam valores de viscosidade e tensão de cedência que acompanham a evolução do abaixamento até um determinado teor de material fino. Acima desse valor, a viscosidade das argamassas e betões aumenta bastante enquanto a tensão de cedência sobe nas argamassas mas desce nos betões devido ao eficaz efeito moente dos agregados grossos (Figuras 4.57 e 4.58). Ainda, na Tabela 4.7, a composição com 10% de diatomite e 0,15% de superplastificante é aquela que contém o teor de agente redutor de água de amassadura suficiente para se aproximar do comportamento da argamassa padrão. contudo, nos betões esta formulação apresenta um

valor superior de abaixamento, como acontecia na composição com maior teor de metacaulino.

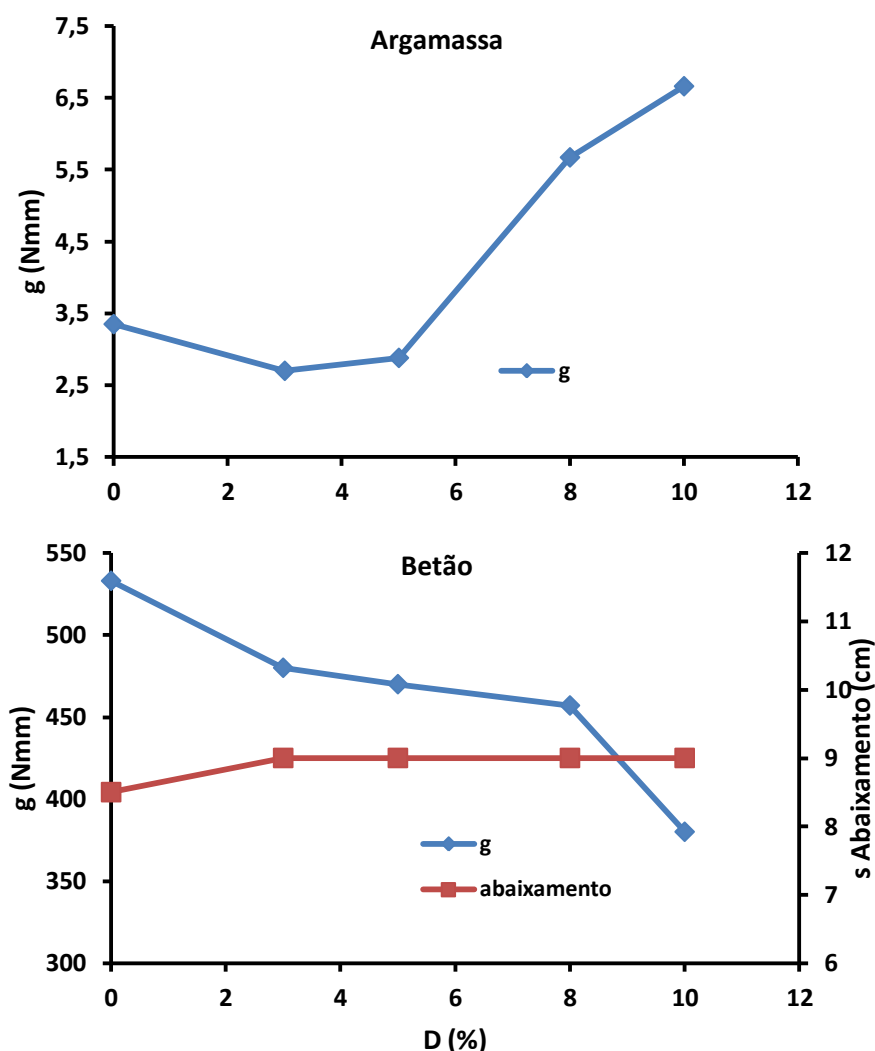


Figura 4.58. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de D , para as argamassas com SP e betões correspondentes.

4.1.4.4. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite

As composições ternárias e o seu ajustamento à curva de torque da argamassa padrão podem ser observadas na figura 4.59. Aos 90 minutos, verifica-se um desvio abaixo da curva padrão para a composição com 5% de metacaulino e 3% de diatomite e um desvio para cima nas composições com 15 e 20% de metacaulino e 3% de diatomite. Estas

composições estão dentro do intervalo admissível para se obter os respectivos betões com a trabalhabilidade desejada.

Também a Figura 4.60, que apresenta o comportamento de h para as diferentes formulações aos 90 minutos mostra uma razoável aproximação ao comportamento da argamassa padrão.

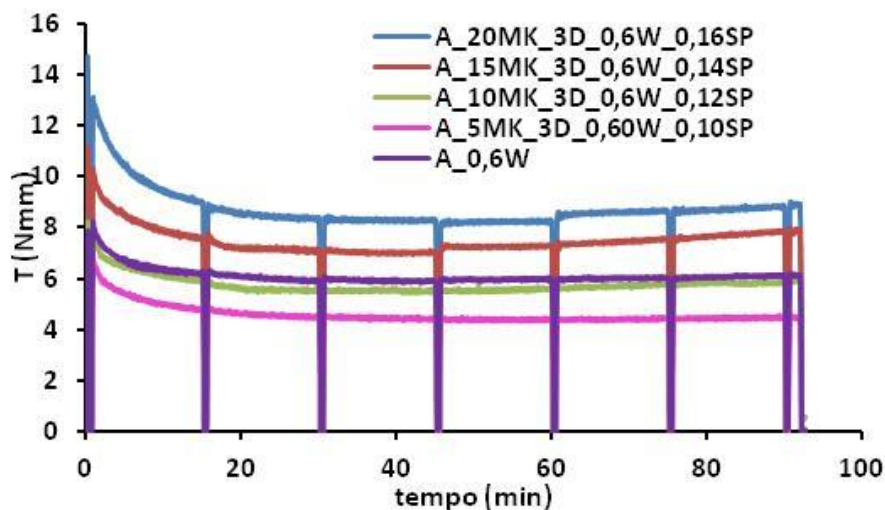


Figura 4.59. Variação do valor do torque, para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

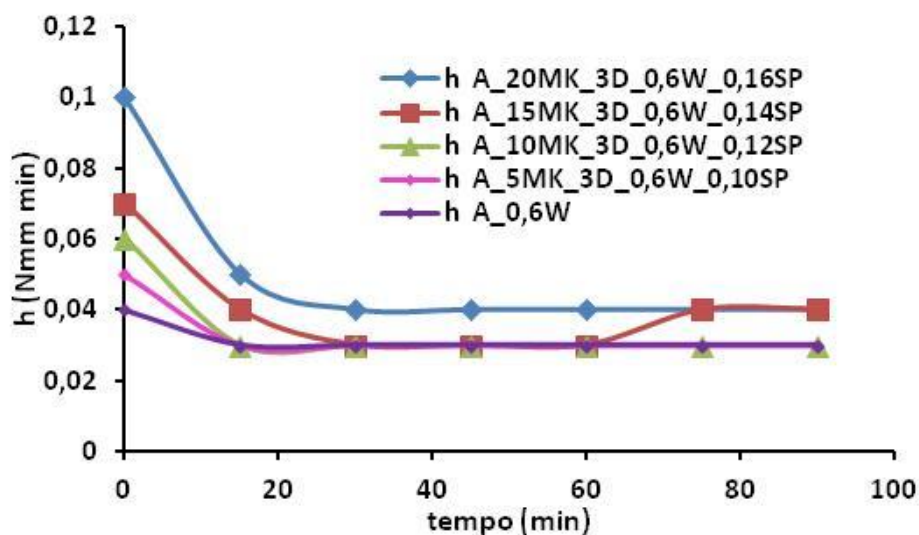


Figura 4.60. Variação do parâmetro h , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.

O comportamento do parâmetro g parece mais disperso (figura 4.61) mas, no entanto, continua bastante aproximado relativamente à argamassa padrão. O mesmo se pode verificar na figura 4.62 que mostra as curvas de fluxo das diferentes formulações com áreas de histerese bastante equivalentes.

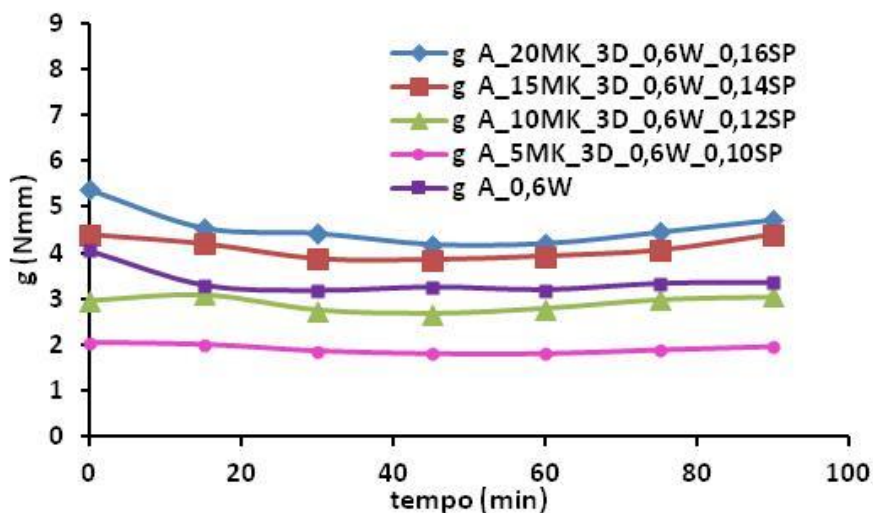
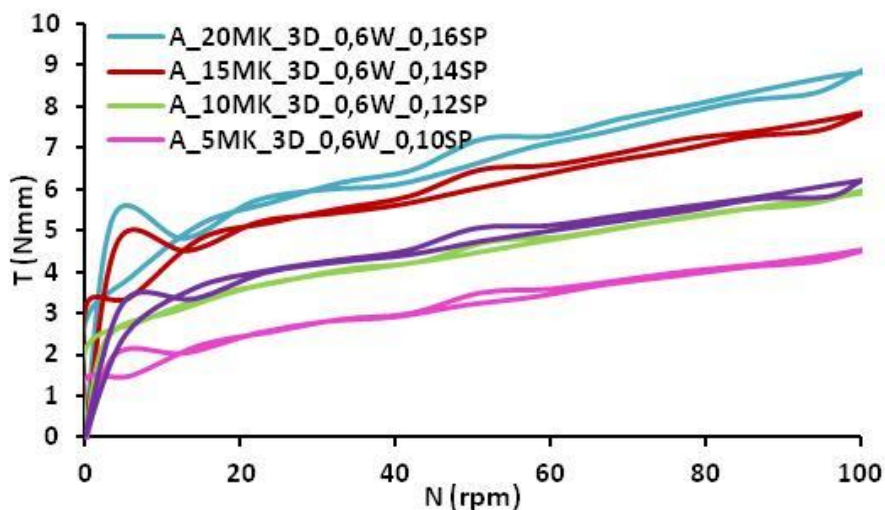


Figura 4.61. Variação do parâmetro g , para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, durante os 90 minutos de teste, mantendo a água de amassadura constante.



4.62. Curvas de fluxo, aos 90 minutos, para as argamassas com diferentes teores de MK, 3% de D e teores de SP ajustados, mantendo a água de amassadura constante.

Relativamente à relação entre os valores de h e g , das argamassas e betões, com os valores do abaixamento, também com estas formulações se repete o comportamento já

observado na análise do metacaulino e diatomite (Tabela 4.8).

Tabela 4.8. Valores dos parâmetros h , g e do abaixamento de Abrams para as argamassas e betões com vários teores de MK, 3% de D e teor em SP ajustado, mantendo a água constante.

Composição Argamassa	h (Nmm min)	g (Nmm)	Composição Betão	h (Nmm min)	g (Nmm)	Abaix. (cm)
A_0,6W	0,03	3,35	B_0,6W	4689	533	8,5
A_5MK_3D_0,6W_0,10SP	0,03	1,95	B_5MK_3D_0,6W_0,10SP	3965	320	9,0
A_10MK_3D_0,6W_0,12SP	0,03	3,05	B_10MK_3D_0,6W_0,12SP	4006	550	8,5
A_15MK_3D_0,6W_0,14SP	0,04	4,41	B_15MK_3D_0,6W_0,14SP	4600	666	8,0
A_20MK_3D_0,6W_0,16SP	0,04	4,72	B_20MK_3D_0,6W_0,16SP	5001	500	8,0

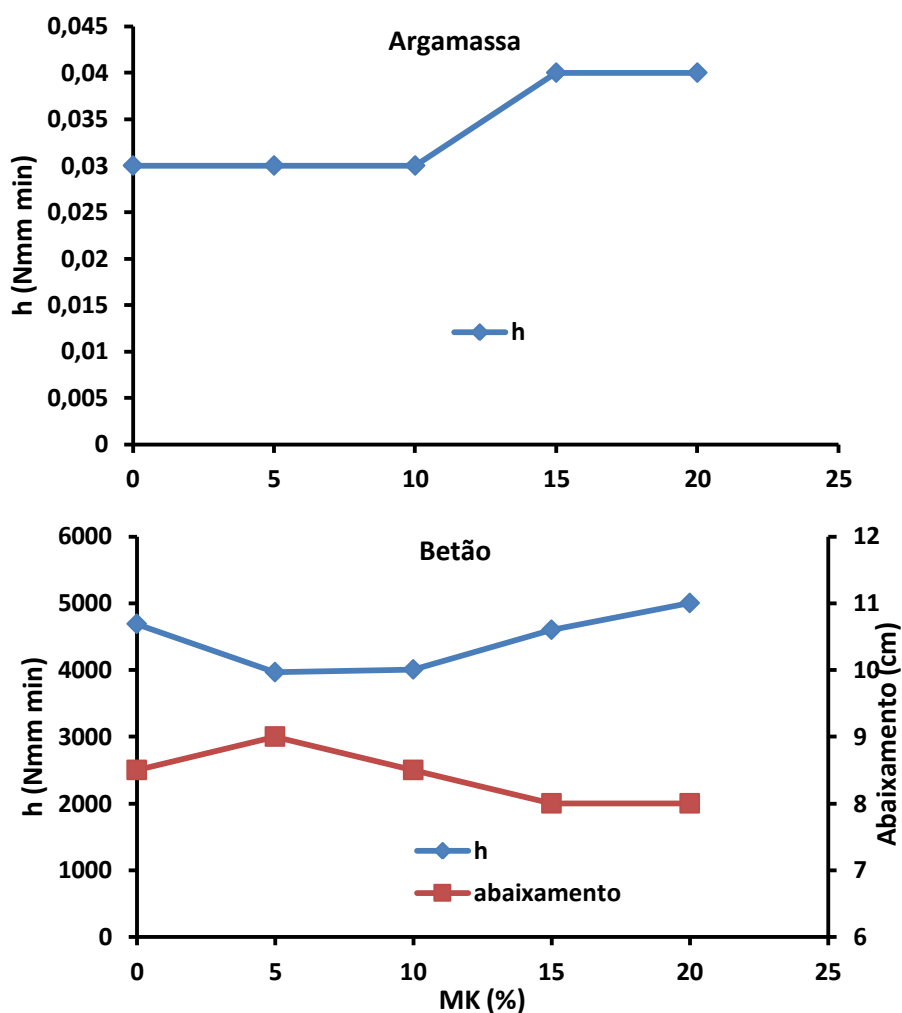


Figura 4.63. Variação dos valores do parâmetro h e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.

Efetivamente o comportamento de h nas argamassas e betões é de diminuição com o aumento da fluidez do sistema, ou seja, com o aumento do abaixamento (Figura 4.63).

Relativamente ao parâmetro g nas argamassas, este aumenta nas composições com maior teor de finos, enquanto nos betões, para essas mesmas composições, o g diminui devido ao efeito desaglomerante dos agregados grossos durante a moagem do betão (Figura 4.64).

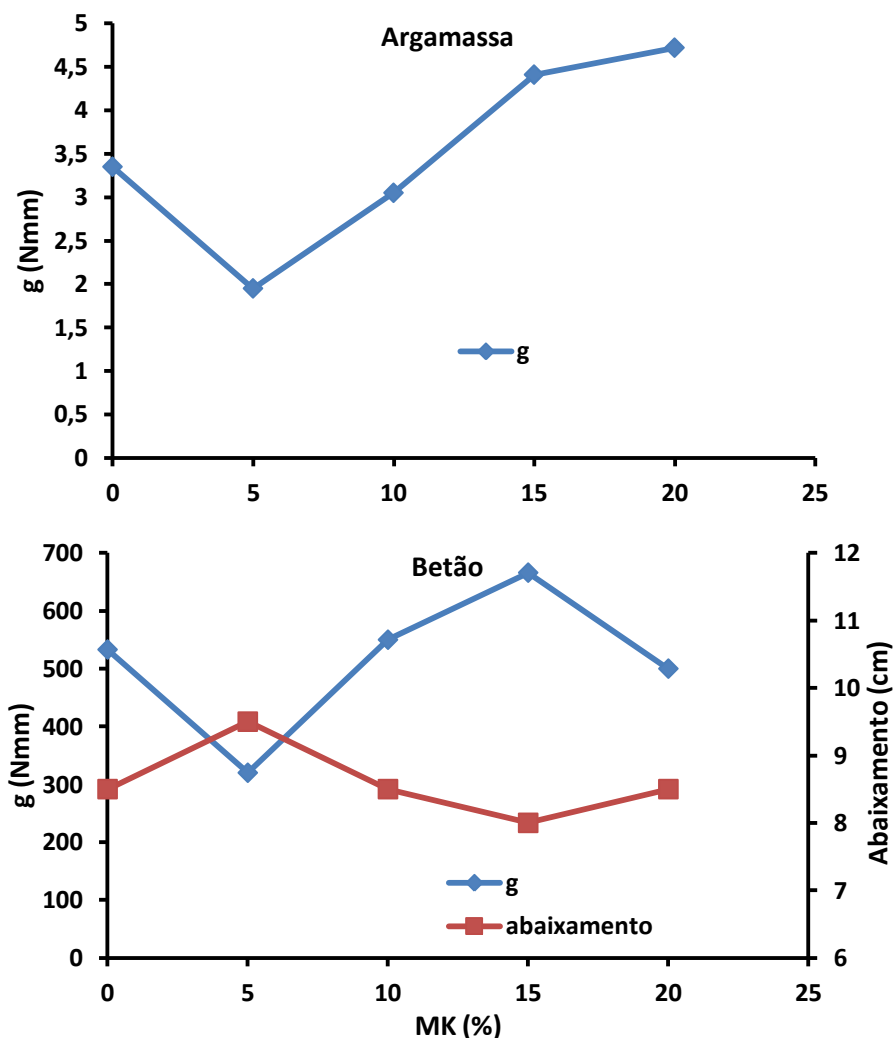


Figura 4.64. Variação dos valores do parâmetro g e do valor do abaixamento, em função o teor de MK, mantendo D constante em 3%, para as argamassas e betões correspondentes.

4.1.5. Síntese sobre o comportamento reológico

Em termos de conclusão, relativamente à reologia de argamassas e betões com substituição parcial do cimento por pozolanas, é possível afirmar que a utilização de pozolanas, sendo estes materiais muito finos, retira a trabalhabilidade às argamassas e aos

betões. O ajuste para a trabalhabilidade desejada no betão que é, neste caso, um abaixamento do cone de Abrams de 9 ± 1 cm, pode ser efetuada através da alteração do teor em água de amassadura ou através do uso de um agente redutor de água de amassadura.

A correlação do comportamento reológico foi feita entre argamassas e betões correspondentes com trabalhabilidade controlada e permitiu avaliar a substituição parcial do cimento por dois materiais pozolânicos diferentes. Esta substituição modificou a fluidez das argamassas e respectivos betões no sentido de um espessamento com notória quebra de trabalhabilidade.

Verificou-se por reometria que através da alteração do teor de água de amassadura se conseguiu ajustar o comportamento reológico e garantir betões correspondentes dentro do intervalo de trabalhabilidade desejado. Aparentemente, usando a água como corrector de trabalhabilidade, a viscosidade é a propriedade que tem maior influência sobre o abaixamento comparativamente à tensão de cedência. Também se pode considerar que existe uma boa relação entre o comportamento reológico das argamassas e os seus betões correspondentes, nomeadamente no que se refere ao comportamento da viscosidade e da tensão de cedência. Poder-se-ia afirmar que, neste caso, o comportamento reológico do betão é condicionado pelo comportamento da argamassa que lhe serve de base.

A utilização do agente redutor de água de amassadura como elemento para ajustar a trabalhabilidade das diferentes composições à argamassa padrão, funciona apenas até um determinado teor de material fino. Para quantidades elevadas desses materiais (30% de metacaulino ou 10% de diatomite), a ação moente dos agregados grossos durante a mistura do betão, garante uma desaglomeração que não é possível obter nas argamassas e, consequentemente, a partir de um teor elevado de pozolana não se consegue a correlação entre o comportamento reológico das argamassas e dos betões. No entanto, até esse limite, existe uma relação direta entre o comportamento reológico das argamassas e o dos betões correspondentes.

4.2. Comportamento no estado endurecido de argamassas e betões

A análise das características em estado endurecido de argamassas e betões com pozolanas iniciou-se com a comparação entre a resistência à compressão, aos 28 dias de cura, das argamassas e dos respetivos betões, tendo em conta a introdução de pozolanas,

nomeadamente o metacaulino e a diatomite, como substitutos parciais do cimento. O efeito da alteração do teor de água de amassadura e a introdução de um agente redutor de água de amassadura serão avaliados. Pretende-se com estas alterações estabelecer uma correlação entre o comportamento mecânico, das argamassas com os seus betões correspondentes.

Seguidamente, este estudo vai avaliar o efeito das variáveis anteriormente citadas em diferentes propriedades em endurecido apenas do betão, nomeadamente a resistência mecânica à compressão aos 7 e 28 dias e, também aos 7 meses, o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico (E), o consumo de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), utilizando para isso análises térmicas, a porosidade e a sua distribuição no betão e, para finalizar, neste estudo irá ser avaliado o efeito das alterações anteriores sobre a durabilidade do betão, usando para tal dois métodos para determinação do teor em cloretos nos betões, imersos numa solução salina artificial.

4.2.1. Correlação entre a resistência mecânica à compressão de argamassas e betões com pozolanas.

Usando a análise reométrica, através da utilização de um reómetro específico para argamassas, a trabalhabilidade das argamassas desenvolvidas com metacaulino e diatomite ou a mistura dos dois foram ajustadas à trabalhabilidade apresentada pela argamassa padrão. Com estas composições foram produzidos provetes em moldes de dimensões $150 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. Após desmoldagem, um dia depois, os corpos de prova foram acondicionados numa sala com ambiente controlado de $95 \pm 5\%$ de humidade relativa (HR) e $20 \pm 5^\circ\text{C}$, durante 28 dias. Aos 28 dias de cura, determinou-se a resistência mecânica das argamassas. A partir das argamassas, os betões correspondentes são produzidos de acordo com o procedimento indicado na metodologia experimental e, apresentam um abaixamento de cone de Abrams entre 8 e 10 cm. Foram produzidas amostras de betão com as dimensões de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Tal como nas argamassas, após desmoldagem foram colocados na sala condicionada onde se encontravam as argamassas e, após 28 dias foi determinada a sua resistência à compressão. O objetivo desta secção é verificar se existe uma relação entre a resistência à compressão, aos 28 dias de cura, entre as argamassas e betões correspondentes, tal como se verificou na análise do comportamento reológico.

4.2.1.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de argamassas e betões com pozolanas.

Na produção de betão existe o risco deste apresentar dificuldades no enchimento dos moldes e na compacidade do material em redor das armaduras, devido a falta de trabalhabilidade. Uma compactação inadequada promove baixa resistência mecânica e pouca durabilidade do produto endurecido [Banfill 2011].

A maioria dos estudos [Glasser et al. 2008, Khatib 2008, Khatib et al 1996] mostra que a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos melhora a resistência mecânica das argamassas e betões mas, também melhora a durabilidade dos betões. No entanto, no estado fresco, a sua presença diminui a trabalhabilidade dos sistemas tal como se observou no capítulo anterior. A forma mais fácil de conseguir betão mais fluido é através do aumento do teor em água de amassadura. No entanto, esta alteração poderá implicar modificações nas propriedades do material final [Banfill 2011].

4.2.1.1.1. Incorporação de metacaulino.

O metacaulino sendo um material extremamente fino, apresenta uma área superficial muito elevada onde a água se vai ligar, diminuindo assim a quantidade de água livre para lubrificação do sistema, tornando-se expectável a necessidade de aumentar o teor de água em betões e argamassas com metacaulino. No entanto, devido à elevada finura das partículas de metacaulino, com elevada energia superficial, estas têm tendência para se agrupar aleatoriamente, formando aglomerados que contêm muitos vazios no seu interior. O aumento do teor de água e a agitação durante a mistura da argamassa não é suficiente para destruir a maioria dos aglomerados. Desta forma, a água necessária para manter a trabalhabilidade das argamassas não é tão elevada como seria de esperar pois, a sua adsorção ocorre em redor dos aglomerados e não das partículas individuais de metacaulino.

A Tabela 4.9 mostra os valores da resistência mecânica para as argamassas com diferentes teores de metacaulino. Na produção de argamassas e betões com introdução de metacaulino, para além das composições com teores de metacaulino com 10, 20 e 30%, analisaram-se reologicamente e executaram-se corpos de prova para avaliação da resistência mecânica de novas composições com teores de substituição do cimento de 5, 15 e 25% de metacaulino. Como é normal, neste tipo de materiais, a resistência à flexão é muito menor do que a resistência à compressão. No entanto, os valores da resistência

mecânica são bastante elevados pois estas argamassas contêm 40% (massa) de ligante, e apenas 60% (massa) de agregado.

Tabela 4.9. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em metacaulino (28 dias de cura).

Composição	Rf (MPa)	Rc (MPa)
A_0,6W	8,73±0,4	31,32±0,5
A_5MK_0,63W	7,90 ± 0,4	30.83 ± 0.6
A_10MK_0,65W	6,67±0,5	30,50±0,2
A_15MK_0,69W	5,74 ± 0,5	27,00 ±0,8
A_20MK_0,70W	6,01±0,5	28,00±1,0
A_25MK_0,73W	3,69 ± 0,2	26,80 ± 0,7
A_30MK_0,75W	4,58±0,4	16,68±1,1

Quando se compara os valores da resistência à compressão das argamassas com os betões respetivos (Tabela 4.10), verifica-se que os resultados para os betões, em geral, não são muito mais elevados que os apresentados pelas argamassas. Os betões contêm na sua composição apenas 17,5% (massa) de ligante para 82,5% (massa) de agregados. No entanto, nos betões, como os agregados grossos são adicionados secos, a relação água / ligante não é de 0,6, tal como nas argamassas mas, na prática, de 0.5, pois parte da água foi absorvida pelas britas.

Como se pode observar na Figura 4.65, o betão mostra sempre valores superiores aos apresentados pelas argamassas. Este facto deve-se á presença dos agregados grossos calcários que têm uma resistência à compressão de cerca de 60 MPa e, principalmente ao maior poder destrutivo do betão, devido à ação moente dos agregados grossos, relativamente aos aglomerados de metacaulino. O metacaulino, que possui uma reatividade pozolanica de cerca de 1100 mg de Ca(OH)_2 / g de pozolana, determinada pelo método de Chapelle modificado, quando aglomerado perde parte da sua reatividade devido à menor superfície de exposição. Por outro lado, também se pode observar na Figura 4.65, que a resistência à compressão diminui com o aumento do teor em metacaulino, tanto nas argamassas como nos betões. Considera-se que esta diminuição não se deve apenas ao aumento da quantidade de água de amassadura, pois se toda a água que foi colocada em excesso se encontrar adsorvida nas partículas ou aglomerados de partículas de metacaulino,

ela não contribui para a porosidade dos materiais mas apenas para a retração durante a secagem dos materiais [Mehta 2005],

Tabela 4.10. Valores de resistência à compressão para as argamassas com metacaulino e betões correspondentes (28 dias de cura).

Composição argamassa	Rc (MPa)	Composição betão	Rc (MPa)	A_Rc / B_Rc (%)
A_0,6W	31,32±0,5	B_0,6W	38,07 ± 1,0	82,27
A_5MK_0,63W	30,83 ± 0,6	B_5MK_0,63W	36,10 ± 1,0	83,66
A_10MK_0,65W	30,50±0,2	B_10MK_0,65W	38,40 ± 1,4	84,96
A_15MK_0,69W	27,00 ± 0,8	B_15MK_0,69W	32,20 ± 0,3	81,33
A_20MK_0,70W	28,00±1,0	B_20MK_0,70W	34,30 ± 0,9	81,63
A_25MK_0,73W	26,80 ± 0,7	B_25MK_0,73W	31,15 ± 1,0	79,62
A_30MK_0,75W	16,68±1,1	A_30MK_0,75W	30,30 ± 0,6	67,23
<i>Média de A_Rc / B_Rc , sem o valor correspondente aos 25 e 30% de MK</i>				82,77

A tendência de diminuição da resistência com o aumento do teor em metacaulino deve-se também à quantidade de ar que se encontra no interior dos aglomerados, sendo tanto maior quanto maior for a quantidade em metacaulino. Este efeito é menor no betão devido à sua maior capacidade desaglomerante. Este facto é notório para a composição com 30% de metacaulino, onde a curva da resistência das argamassas, que era praticamente paralela à curva de resistência do betão, mostra um afastamento para um valor bastante mais baixo, o que corrobora o comportamento observado na análise reológica, que para este valor de metacaulino, não apresentava uma correlação entre sua reologia e a do betão correspondente.

Retomando a Tabela 4.10, ela mostra a razão entre a resistência das argamassas e a resistência dos betões correspondentes. Os resultados mostram que, para valores de metacaulino menores que 25% o valor médio da resistência das argamassas é cerca de 83% do valor da resistência do betão. Tal como na análise reológica, também no estudo da resistência mecânica, acima de 20% de metacaulino não se verifica correlação entre as argamassas e os betões correspondentes.

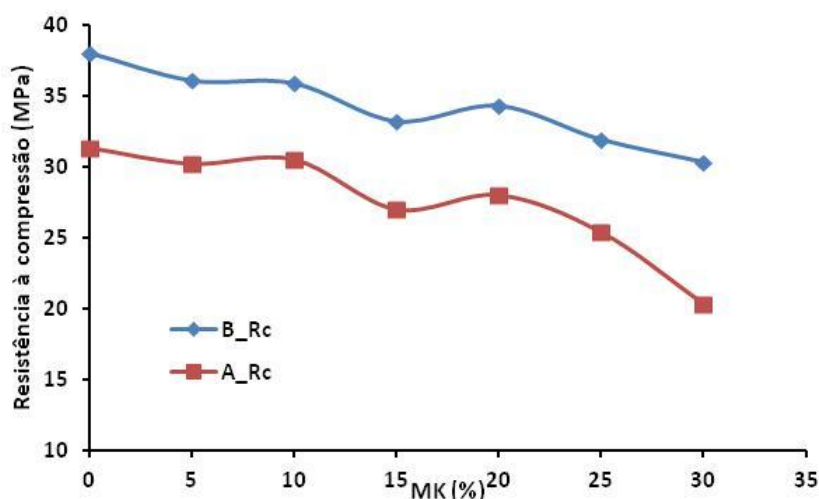


Figura 4.65. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em MK.

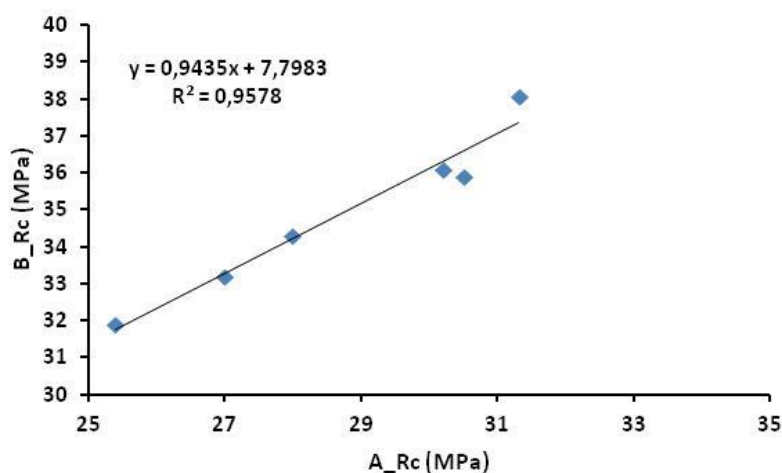


Figura 4.66. Relação linear entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino (0, 5, 10, 15, 20%) e os seus betões correspondentes.

A Figura 4.66 mostra que existe uma relação linear entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino e a resistência à compressão dos betões correspondentes.

4.2.1.1.2. Incorporação de diatomite

Comparando com o metacaulino, a diatomite tem uma área superficial de cerca de metade e é muito porosa, com absorção de água acima dos 96%. Relativamente à sua composição química, possui 81,71% sílica amorfa, enquanto o metacaulino apresenta apenas 52,17% de sílica amorfa mas também tem 44,50% de alumina amorfa. A alumina é

muito mais rápida na sua reação com o hidróxido de cálcio, libertado pelas reações de hidratação do cimento, do que a sílica amorfa [Chao Li et al 2010]

A Tabela 4.11 mostra os valores da resistência à flexão e à compressão para argamassas com teores em diatomite entre 3 e 8%. Comparando com as formulações de metacaulino, com quantidades mais elevadas, verifica-se que estas argamassas mostram valores de resistência equivalentes aos apresentados pelo metacaulino. Como já foi referido anteriormente, os aglomerados de diatomite são mais facilmente destruídos que os de metacaulino e, por isso, estas argamassas são bastante fluidas. A separação das partículas melhora a sua reatividade, favorecendo as reações pozolânicas. No entanto, continua a observar-se uma diminuição da resistência com o aumento do teor em pozolana. As partículas de diatomite encontram-se saturadas de água (96% massa) e, embora essa água não contribua para a porosidade capilar, essa água também não contribui para um aumento da resistência.

Tabela 4.11. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em diatomite (28 dias de cura).

Composição	Rf (MPa)	Rc (MPa)
A_0,6W	8,73 ± 0,4	31,32 ± 0,6
A_3D_0,65W	6,91 ± 0,8	31,35 ± 0,4
A_5D_0,67W	7,17 ± 0,7	30,56 ± 1,0
A_8D_0,70W	6,73 ± 0,5	29,39 ± 0,8
A_10D_0,73W	5,27 ± 0,6	24,48 ± 0,6

Relativamente aos betões correspondentes, pode ser visto na Tabela 4.12 que estes apresentam valores menores aos apresentados pelas formulações com metacaulino (Tabela 4.10). Embora com uma relação real a/l menor que as argamassas, os betões têm apenas 17,5% (massa) de ligante. A substituição parcial do cimento por diatomite saturada de água provoca uma diminuição substancial da resistência dos betões, de tal forma que apresentam valores equivalentes aos apresentados pelas respetivas argamassas, tal como se pode observar na Figura 4.67. Também a razão entre a resistência à compressão das argamassas e os betões é bastante diferente da apresentada entre a argamassa e o betão padrão.

A Figura 4.68 que apresenta a relação entre a resistência mecânica das argamassas com diatomite e os betões correspondentes, mostra que não existe uma relação entre a resistência das argamassas com diatomite e os betões correspondentes, quando o ajuste de trabalhabilidade é conseguido através da alteração do teor de água de amassadura.

Tabela 4.12. Valores de resistência à compressão para as argamassas com diatomite e betões correspondentes (28 dias de cura).

Composição argamassa	Rc (MPa)	Composição betão	Rc (MPa)	A_Rc / B_Rc (%)
A_0,6W	31,32 ± 0,6	B_0,6W	38,07 ± 1,0	82,27
A_3D_0,65W	31,35 ± 0,4	B_3D_0,65W	32,72 ± 1,0	106,01
A_5D_0,67W	30,56 ± 1,0	B_5D_0,67W	31,17 ± 0,5	101,26
A_8D_0,70W	29,39 ± 0,8	B_8D_0,70W	26,60 ± 1,0	110,49
A_10D_0,73W	24,48 ± 0,6	B_10D_0,73W	26,30 ± 0,9	93,08

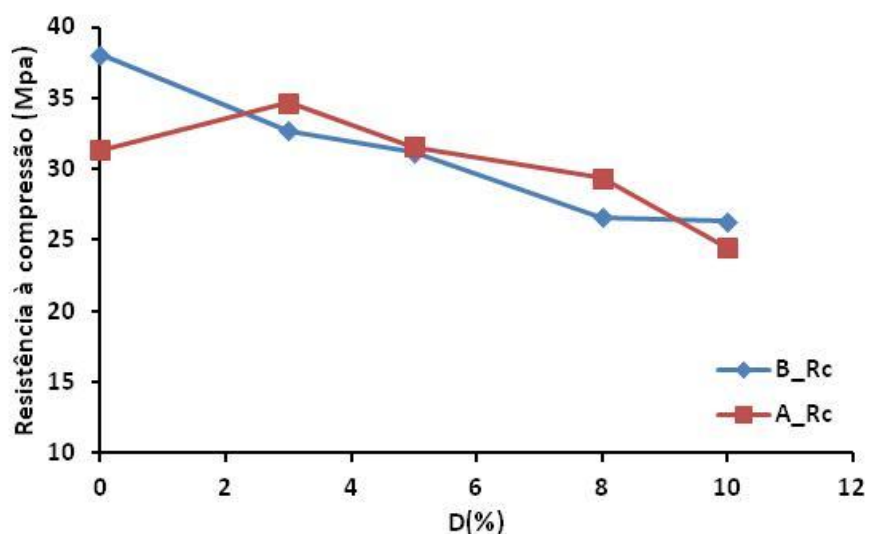


Figura 4.67. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em D (0, 3, 5, 8, e 10%).

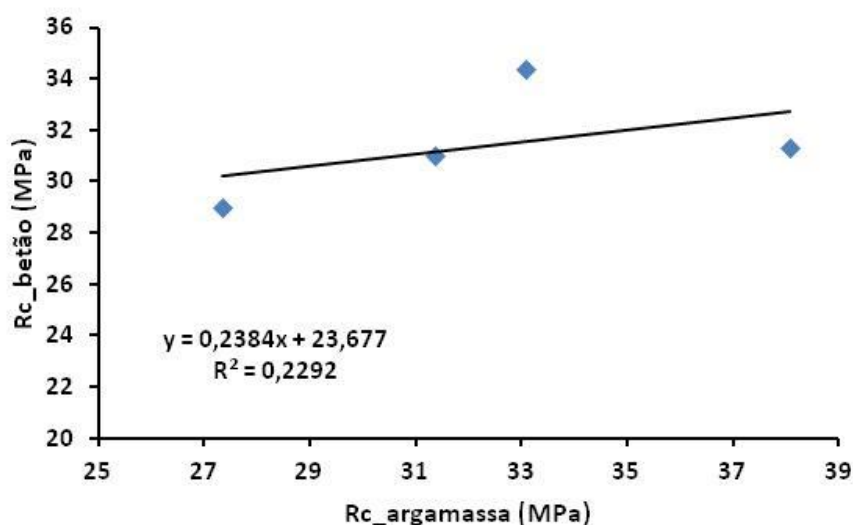


Figura 4.68. Relação entre a resistência à compressão das argamassas e correspondentes betões.

4.2.1.1.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite

A substituição do cimento por uma mistura de metacaulino e diatomite (3%) produz argamassas com valores de resistência mecânica equivalentes às apresentadas pelas formulações apenas com metacaulino (Tabela 4.13). Com o aumento do teor em metacaulino, mantendo-se uma percentagem de 3% de diatomite, verifica-se um aumento do ar incluso nos aglomerados e uma diminuição da resistência mecânica.

Tabela 4.13. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em metacaulino, e 3% de diatomite (28 dias de cura).

Composição	Rf (MPa)	Rc (MPa)
A_0,6W	8,73 ± 0,4	31,32 ± 0,6
A_5MK_3D_0,67W	5,00 ± 0,5	31,10 ± 0,6
A_10MK_3D_0,70W	5,39 ± 0,6	29,00 ± 0,5
A_15MK_3D_0,72W	4,12 ± 0,4	28,20 ± 0,6
A_20MK_3D_0,75W	3,93 ± 0,1	27,15 ± 0,7

No entanto, estas formulações, quando aplicadas aos betões mostram um comportamento diferente (Tabela 4.14). Para os teores mais baixos de metacaulino (5 e 10%), o efeito da diatomite sobrepõe-se ao do metacaulino e, as argamassas mostram valores de resistência superiores às dos betões; quando a quantidade de metacaulino

aumenta (15 e 20%), o efeito do metacaulino é predominante e os betões mostraram resistência superior às argamassas (Figura 4.69). Tal como na diatomite a razão entre os valores da resistência à compressão das argamassas e dos betões é diferente do padrão.

Tabela 4.14. Valores de resistência à compressão para as argamassas com 3% de diatomite , diferentes teores em metacaulino e respetivos betões (28 dias de cura).

Composição argamassa	Rc (MPa)	Composição betão	Rc (MPa)	A_Rc / B_Rc (%)
A_0,6W	31,32 ± 0,6	B_0,6W	38,07 ± 1,0	82,27
A_5MK_3D_0,67W	31,10 ± 0,6	B_5MK_3D_0,67W	28,55 ± 0,3	108,93
A_10MK_3D_0,70W	29,00 ± 0,5	B_10MK_3D_0,70W	27,63 ± 0,3	104,95
A_15MK_3D_0,72W	28,20 ± 0,6	B_15MK_3D_0,72W	29,77 ± 10,6	94,73
A_20MK_3D_0,75W	27,15 ± 0,7	B_20MK_3D_0,75W	28,67 ± 0,6	94,70

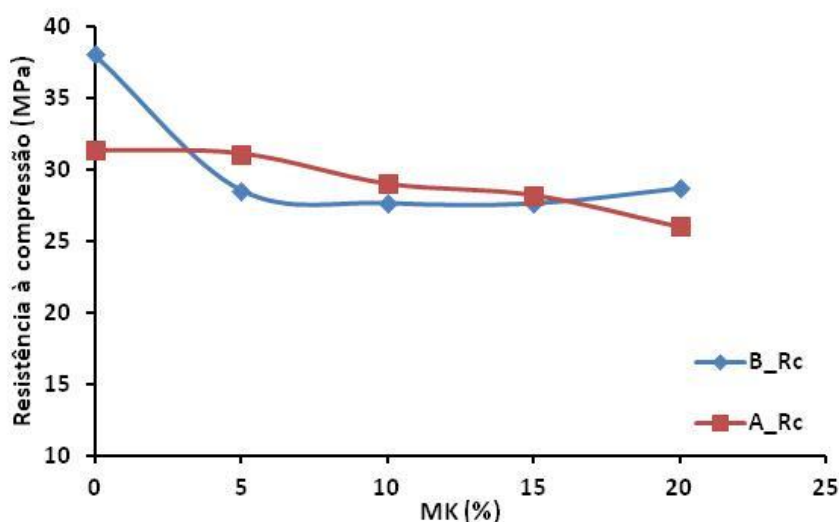


Figura 4.69. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em MK e D constante (3%).

Da mesma forma que se observou nas formulações com diatomite, nas composições mistas (metacaulino e diatomite) também não se verifica uma relação linear entre as resistências das argamassas e dos betões (Figura 4.70).

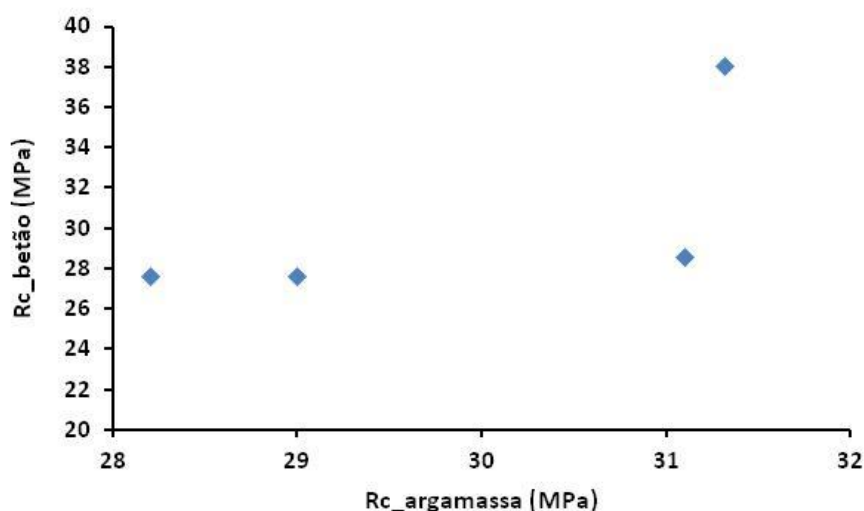


Figura 4.70. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino e diatomite e os correspondentes betões.

A comparação da evolução da resistência à compressão com o teor em pozolana, para as argamassas com metacaulino, diatomite e a mistura do metacaulino com diatomite está patente na Figura 4.71. Pode-se considerar que não existe grande diferença entre as diferentes curvas, com exceção para o último valor da curva das formulações com diatomite, em que o efeito das partículas saturadas de água já terá efeito sobre a resistência da argamassa.

Considerando a figura 4.72, onde se pode observar a evolução da resistência à compressão dos betões correspondentes, verifica-se uma separação entre as formulações com e sem diatomite. As composições com diatomite mostram um maior enfraquecimento do betão embora, nas composições com mistura de metacaulino com diatomite, especificamente nas argamassas com quantidades maiores de metacaulino, se observe uma tendência para a aproximação aos valores das curvas das formulações com metacaulino.

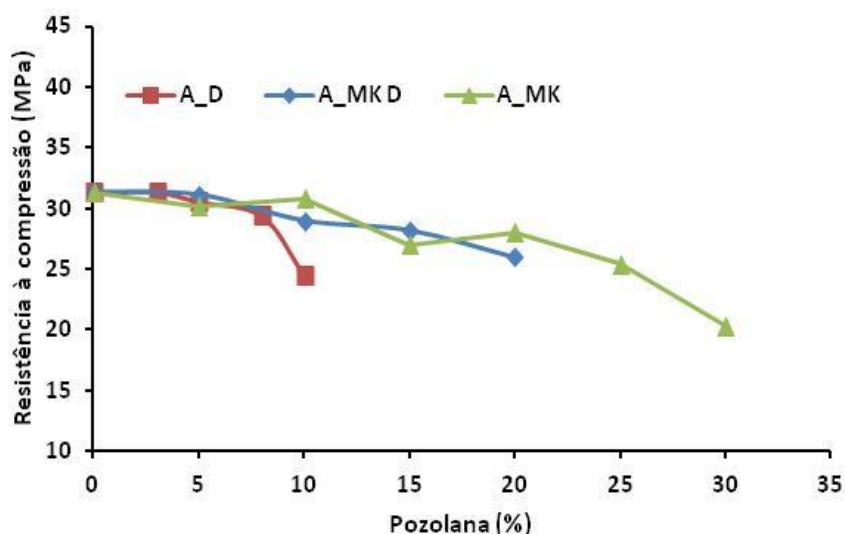


Figura 4.71. Variação da resistência à compressão para argamassas com diferentes pozzolanas.

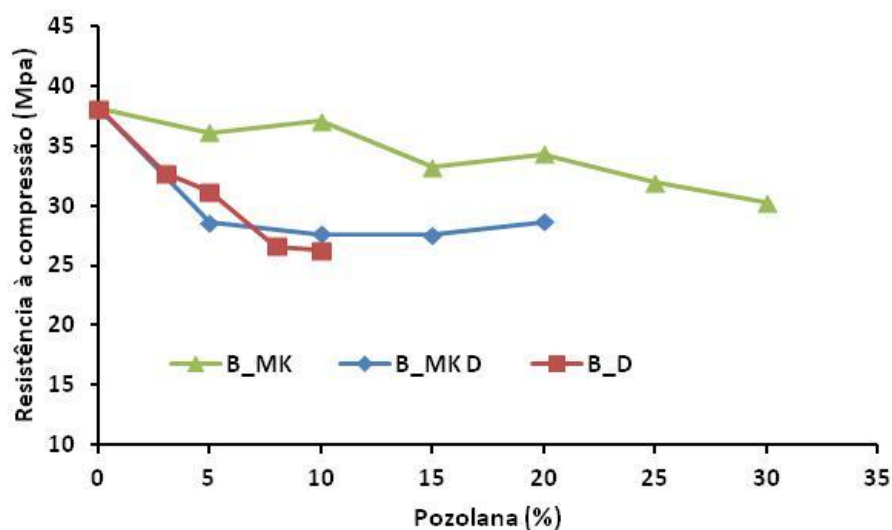


Figura 4.72. Variação da resistência à compressão betões com diferentes pozzolanas.

4.2.1.2. Efeito do agente redutor de água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de argamassas e betões com pozzolanas.

Chandra e Bjornstrom [Chandra et al 2002] afirmam que as propriedades do betão são governadas pelo seu comportamento em fluxo, sendo este controlado pela dispersão das partículas de cimento. Os agentes redutores de água de amassadura são usados para a obtenção de uma melhor fluidez. Estes adsorvem à superfície das partículas nos

aglomerados, desfloculando-as e separando-as, libertando a água presa nos aglomerados. Chandra e Bjornstrom [Chandra et al 2002] também afirmam que a contribuição dos agentes redutores de água de amassadura para o incremento da resistência é largamente maior que a do cimento.

Durante a análise reológica das argamassas foi demonstrado que o agente redutor de água de amassadura também teve este poder de desaglomeração e separação das partículas de materiais pozolânicos.

4.2.1.2.1. Incorporação de metacaulino

A Tabela 4.15 mostra os valores da resistência mecânica de argamassas com diferentes teores de metacaulino e quantidades de agente redutor de água de amassadura (SP) ajustadas, mantendo-se a água de amassadura constante, em 60% da massa do ligante, tal como na argamassa padrão. Relativamente à resistência à flexão pode-se considerar que os valores não melhoraram, quando comparados com os valores obtidos nas argamassas de formulação equivalente quando se utilizou a alteração do teor de água para o ajuste de trabalhabilidade. No entanto, em relação à resistência à compressão, verifica-se um aumento significativo dos valores obtidos. A presença do agente redutor de água de amassadura promoveu a desaglomeração, embora não total, dos aglomerados de cimento e metacaulino e consequente separação das suas partículas com libertação do ar incluso dentro dos aglomerados. As partículas separadas sendo mais reativas reagem em maior grau com o Ca(OH)_2 e também podem atuar como filler na porosidade mais fina. Consequentemente verifica-se um aumento do valor da resistência à compressão com o aumento do teor em metacaulino [Paiva H. et al 2012].

A Tabela 4.16 apresenta uma comparação entre os valores da resistência à compressão entre estas argamassas e os respetivos betões. Como é possível observar, no betão o efeito do aumento da resistência à compressão com o aumento do teor em metacaulino ainda é mais drástica devido ao efeito conjunto do agente redutor de água de amassadura e do poder moente dos agregados grossos do betão. Desta forma consegue-se uma maior desaglomeração do cimento e do metacaulino promovendo um incremento nas reações de hidratação e nas reações pozolânicas. A resistência à flexão das argamassas é, em média, cerca de 84% da resistência à compressão dos seus betões correspondentes. Também aqui, esta relação apenas existe até um valor máximo de metacaulino de 20%, o

qual corresponde ao valor limite de correlação entre argamassas e respectivos betões no estado fresco.

Tabela 4.15. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com teores em metacaulino de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% e diferentes teores de SP.

Composição	Rf (MPa)	Rc (MPa)
A_0,6W	8,73 ± 0,4	31,32 ± 0,6
A_5MK_0,6W_0,05SP	7,60 ± 0,1	33,20 ± 0,5
A_10MK_0,6W_0,1SP	6,79 ± 0,5	37,23 ± 0,5
A_15MK_0,6W_0,13SP	6,78 ± 0,5	36,50 ± 0,8
A_20MK_0,6W_0,15SP	6,46 ± 0,5	38,53 ± 0,8
A_25MK_0,6W_0,19SP	5,40 ± 0,4	39,28 ± 0,9
A_30MK_0,6W_0,20SP	5,49 ± 0,6	43,60 ± 0,1

Tabela 4.16. Valores de resistência à compressão para as argamassas e betões correspondentes com teores em metacaulino de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% e diferentes teores de SP.

Composição argamassa	Rc (MPa)	Composição betão	Rc (MPa)	A_Rc / B_Rc (%)
A_0,6W	31,32 ± 0,6	B_0,6W	38,07 ± 1,0	82,28
A_5MK_0,6W_0,05SP	33,20 ± 0,5	B_5MK_0,6W_0,05SP	39,1 ± 0,6	84,91
A_10MK_0,6W_0,1SP	37,23 ± 0,5	B_10MK_0,6W_0,1SP	42,3 ± 0,8	88,01
A_15MK_0,6W_0,13SP	36,50 ± 0,8	B_15MK_0,6W_0,13SP	43,44 ± 0,2	84,02
A_20MK_0,6W_0,15SP	38,53 ± 0,8	B_20MK_0,6W_0,15SP	44,6 ± 0,3	86,39
A_25MK_0,6W_0,19SP	39,28 ± 0,9	B_25MK_0,6W_0,19SP	43,89 ± 0,8	89,50
A_30MK_0,6W_0,20SP	43,60 ± 0,1	B_30MK_0,6W_0,20SP	46,1 ± 0,6	94,58
<i>Média (%) de A_Rc / B_Rc , sem o valor correspondente aos 25 e 30% de MK:</i>				84,45

A Figura 4.73 mostra a variação da resistência à compressão para as argamassas, com metacaulino e agente redutor de água de amassadura, e os betões correspondentes, onde a curva de resistência das argamassas se mantém aproximadamente paralela à curva de resistência dos betões, exceto para a composição com 30% de metacaulino. A relação linear entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino até 20% e a dos

betões respectivos está patente na Figura 4.74, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,98.

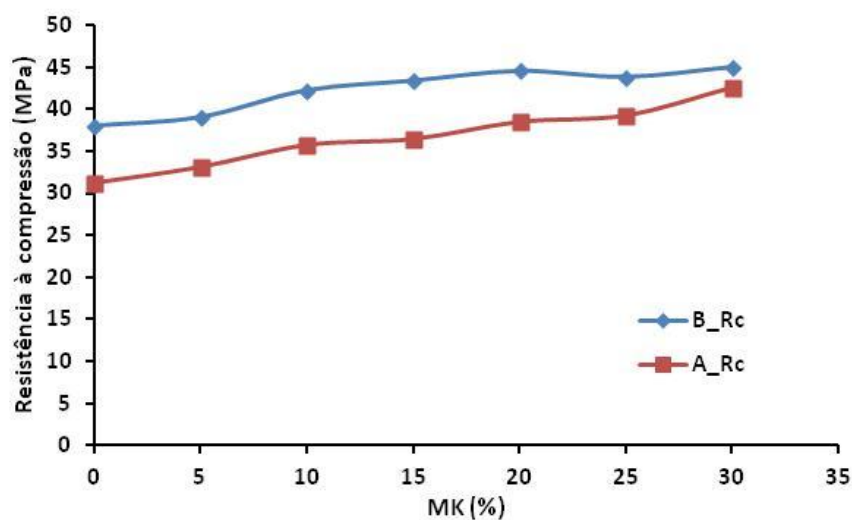


Figura 4.73. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em MK. O teor de SP foi ajustado para cada composição, com água constante.

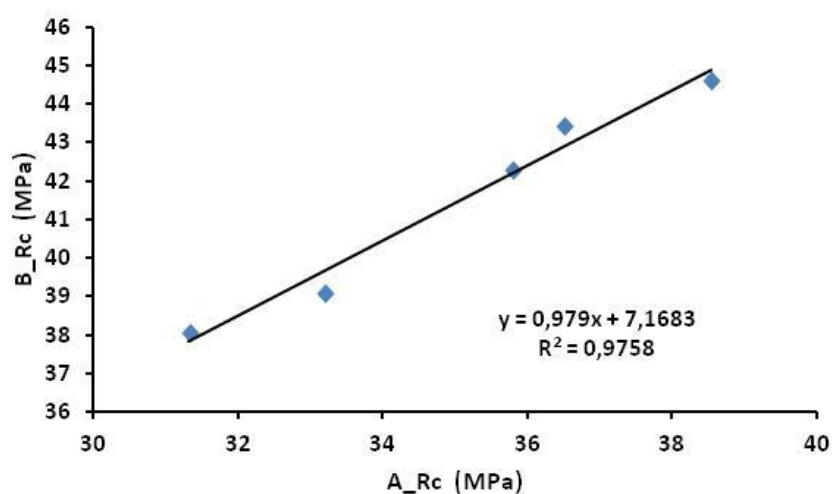


Figura 4.74. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino e diatomite e os correspondentes betões

4.2.1.2.2. Incorporação de diatomite

Com a incorporação da diatomite nas argamassas, mantendo a água constante mas usando um agente redutor de água de amassadura para o controlo da trabalhabilidade, os

resultados para a resistência mecânica estão presentes na Tabela 4.17. Tal como aconteceu com o metacaulino, os valores da resistência à flexão não sofrem alterações quando comparados com as formulações equivalentes, com ajuste de fluidez através da alteração do teor de água. Relativamente aos valores da resistência à compressão, quando comparados com os valores da argamassa padrão, estes praticamente não sofrem grande alteração. A argamassa com 3% de diatomite mostra um valor ligeiramente superior ao da argamassa padrão mas, com o aumento do teor em diatomite a resistência vai diminuindo até que, para 10% de diatomite mostra um valor inferior ao da argamassa padrão.

Relativamente aos resultados da resistência à compressão apresentados pelos betões correspondentes (Tabela 4.18), verifica-se que a utilização da diatomite, até 10%, não altera o comportamento mecânico dos betões. No entanto, apresenta valores de resistência mais elevados que os apresentados quando se usa a água como ajuste de trabalhabilidade. É possível considerar que até aos 10% de diatomite a resistência se mantém idêntica à do betão padrão (Figura 4.75). Este efeito deverá ser devido à baixa reatividade pozolânica da diatomite, na fase inicial de endurecimento do betão, devido à lentidão de reação desta pozolana.

Tabela 4.17. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com teores em diatomite de 3, 5, 8 e 10% e diferentes quantidades de SP.

Composição	Rf (MPa)	Rc (MPa)
A_0,6W	8,73 ± 0,4	31,32 ± 0,6
A_3D_0,6W_0,05SP	6,60 ± 0,2	32,20 ± 0,2
A_5D_0,6W_0,08	7,52 ± 0,4	31,92 ± 0,3
A_8D_0,6W_0,10SP	7,05 ± 0,4	31,26 ± 0,7
A_10D_0,6W_0,12SP	5,94 ± 0,2	30,74 ± 0,2

No que concerne à relação entre resistência à compressão das argamassas com diatomite com as dos betões equivalentes, esta é em média de 84%, incluindo todas as quantidades de diatomite. Na avaliação reológica não existia correlação entre as argamassas e respetivos betões para a composição com 10% de diatomite.

Tabela 4.18. Valores de resistência à compressão para as argamassas e betões correspondentes com teores em diatomite de 3, 5, 8 e 10% e quantidades ajustadas de SP.

Composição argamassa	Rc (MPa)	Composição betão	Rc (MPa)	A_Rc / B_Rc (%)
A_0,6W	31,32 ± 0,6	B_0,6W	38,07 ± 1,0	82,28
A_3D_0,6W_0,05SP	32,20 ± 0,2	B_3D_0,6W_0,05SP	37,65 ± 0,8	85,52
A_5D_0,6W_0,08	31,92 ± 0,3	B_5D_0,6W_0,08	37,00 ± 0,7	86,27
A_8D_0,6W_0,10SP	31,26 ± 0,7	B_8D_0,6W_0,10SP	37,38 ± 0,8	83,63
A_10D_0,6W_0,12SP	30,74 ± 0,2	B_10D_0,6W_0,12SP	37,70 ± 0,5	81,54
<i>Média (%) de A_Rc / B_Rc, sem o valor correspondente aos 10% de D:</i>				84,24

Em relação à Figura 4.76, que apresenta a relação entre a resistência à compressão das argamassas com diatomite e a resistência à compressão dos respectivos betões, verifica-se que, não existe uma relação linear entre as resistências dos dois materiais.

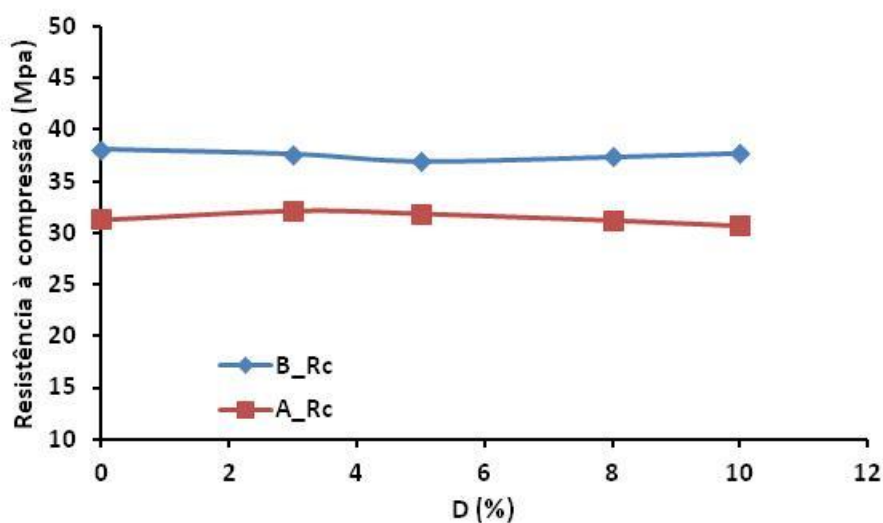


Figura 4.75. Variação da resistência à compressão para argamassas e correspondentes betões com diferentes teores em D. O teor de SP foi ajustado para cada composição, com a água constante.

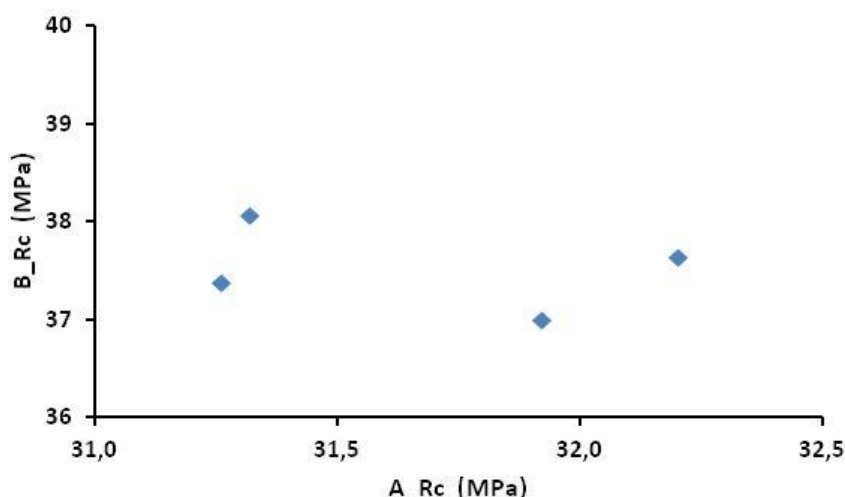


Figura 4.76. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com diatomite e os betões correspondentes.

4.2.1.2.3. Incorporação conjunta de metacaulino e diatomite

Na utilização simultânea de metacaulino e diatomite como substitutos parciais do cimento, a Tabela 4.19 mostra os valores da resistência mecânica das argamassas com diferentes quantidades de metacaulino e 3% de diatomite. A resistência à flexão baixa com o aumento do teor em pozolanas, no entanto, a resistência à compressão apresenta um incremento dos seus valores com o aumento da quantidade em metacaulino.

Tabela 4.19. Valores de resistência mecânica à flexão e à compressão para as argamassas com diferentes teores em metacaulino, 3% de diatomite e quantidades de SP ajustadas.

Composição	Rf (MPa)	Rc (MPa)
A_0,6W	8,73 ± 0,4	31,32 ± 0,6
A_5MK_3D_0,6W_0,10SP	6,54 ± 0,4	32,52 ± 0,8
A_10MK_3D_0,6W_0,12SP	5,62 ± 0,6	34,40 ± 0,2
A_15MK_3D_0,6W_0,14SP	4,02 ± 0,2	35,11 ± 0,2
A_20MK_3D_0,6W_0,16SP	3,84 ± 0,1	36,09 ± 0,4

A comparação entre os valores da resistência à compressão das argamassas e os valores dos betões correspondentes encontra-se na Tabela 4.20. Verifica-se que a evolução da resistência nos betões é principalmente controlada pelo metacaulino mas, no entanto a presença da diatomite promove uma quebra na resistência pois o betão apenas com metacaulino, para teores iguais (10 e 20%) apresentava valores superiores.

Tabela 4.20. Valores de resistência à compressão para as argamassas e respectivos betões com 3% de diatomite, diferentes teores em metacaulino e quantidades de SP ajustadas.

Composição argamassa	Rc (MPa)	Composição betão	Rc (MPa)	A_Rc / B_Rc (%)
A_0,6W	31,32 ± 0,6	B_0,6W	38,07 ± 1,0	82,27
A_5MK_3D_0,6W_0,10SP	32,52 ± 0,8	B_5MK_3D_0,6W_0,10SP	38,85 ± 0,5	83,66
A_10MK_3D_0,6W_0,12SP	34,40 ± 0,2	B_10MK_3D_0,6W_0,12SP	39,80 ± 0,8	86,43
A_15MK_3D_0,6W_0,14SP	35,11 ± 0,2	B_15MK_3D_0,6W_0,14SP	40,50 ± 0,7	86,67
A_20MK_3D_0,6W_0,16SP	36,09 ± 0,4	B_10MK_3D_0,6W_0,16SP	41,95 ± 0,4	86,05
<i>Média (%) de A_Rc / B_Rc: 85,02</i>				

A Figura 4.77 mostra claramente que o incremento da resistência com aumento do teor em pozolanas é menor que o observado nas formulações de argamassas e betões apenas com metacaulino (Figura 4.73). Este comportamento comprova que a presença da diatomite (3%) não favorece a resistência mecânica, devido à sua elevada porosidade e também consequência da sua baixa reatividade pozolânica.

No entanto, apesar da diminuição dos valores da resistência das argamassas e betões com mistura de metacaulino e diatomite, quando comparadas com as formulações apenas com metacaulino, é possível observar que estas composições mistas apresentam uma relação linear entre a resistência das argamassas e dos respectivos betões, com um fator de correlação de 0,99 (Figura 4.78).

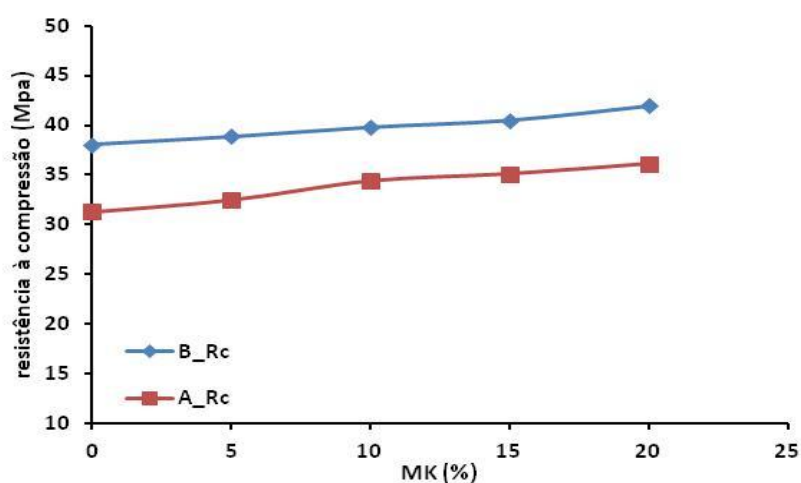


Figura 4.77. Variação da resistência à compressão para as argamassas e os betões com diferentes teores em MK e 3%D. O teor de SP foi ajustado para cada composição, com a água constante.

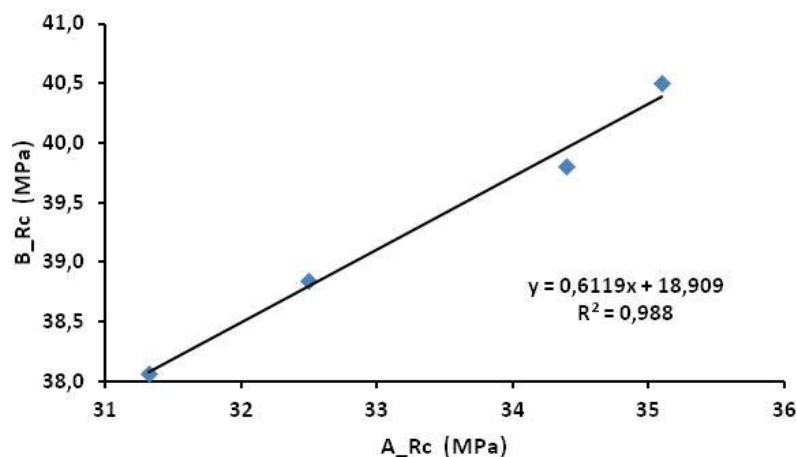


Figura 4.78. Relação entre a resistência à compressão das argamassas com metacaulino e diatomite e os betões correspondentes.

A comparação da evolução da resistência à compressão com o teor em pozolana, para as argamassas com metacaulino, diatomite e a mistura do metacaulino com diatomite pode ser observada na Figura 4.79. Visivelmente as formulações com diatomite mostram valores de resistência menores principalmente para as composições com 8 e 10% de diatomite. Os valores da resistência das composições com mistura de metacaulino e diatomite não se afastam muito dos apresentados pelas composições apenas com metacaulino. Como a composição das argamassas possui 40% de ligante, a substituição de 3% de cimento por diatomite não afeta muito os resultados.

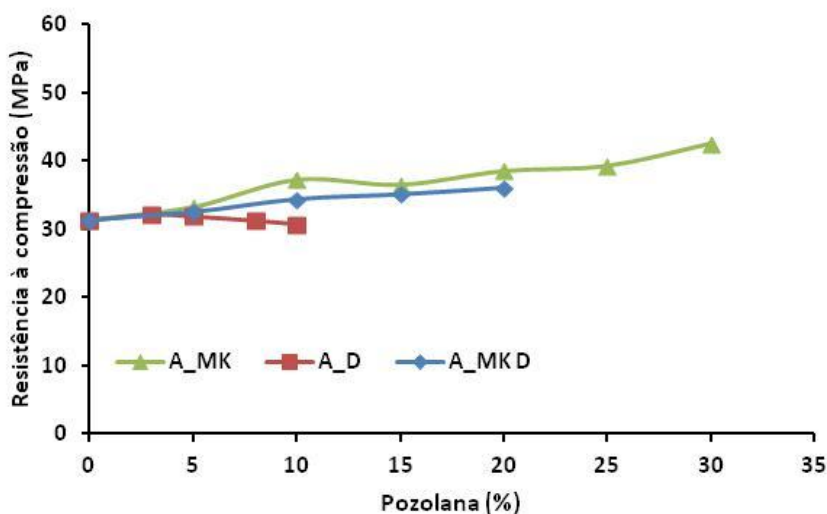


Figura 4.79. Variação da resistência à compressão para argamassas com diferentes pozolanas e teores de SP ajustados.

No entanto, na comparação da evolução da resistência com o teor de pozolana, nos betões cuja composição inclui apenas 17,5% de ligante, a presença da diatomite claramente baixa a resistência comparativamente com as formulações apenas com metacaulino (Figura 4.80).

As composições apenas com diatomite aparentemente conseguem manter a resistência idêntica à do betão padrão e, os betões com metacaulino e diatomite (3%) mostram um aumento consecutivo da resistência com o aumento do teor em metacaulino.

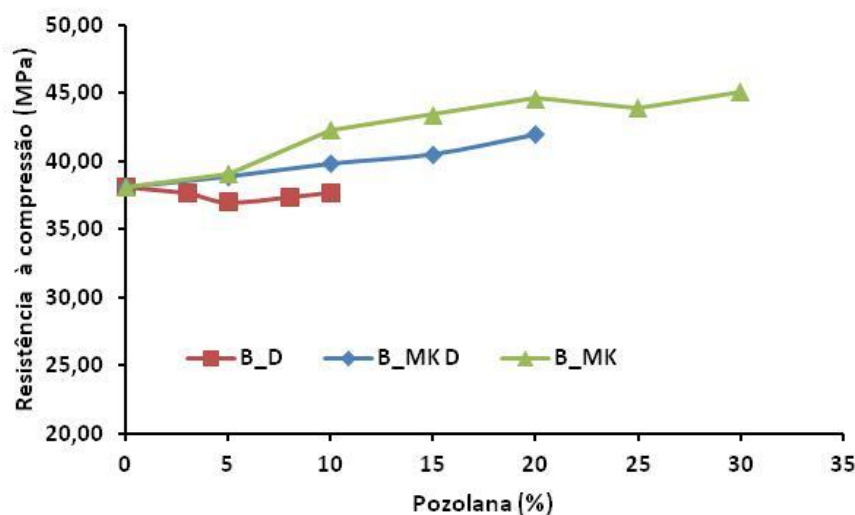


Figura 4.80. Variação da resistência à compressão para betões com diferentes pozolanas e teores de SP ajustados.

4.2.1.2.4. Síntese da análise da correlação entre a resistência à compressão de argamassas e betões com pozolanas.

Em síntese, relativamente à correlação entre as resistências à compressão de argamassas e betões com substituição parcial do cimento por pozolanas, é possível afirmar que para os betões com um abaixamento do cone de Abrams de 9 ± 1 cm, se verifica uma correlação com a maioria das argamassas correspondentes.

Verificou-se que quando o ajuste de trabalhabilidade é efectuado através da alteração do teor de água de amassadura, há uma diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor em pozolanas, tanto nas argamassas como nos respectivos betões. Esta diminuição, no metacaulino, é devida principalmente ao aumento do teor em

aglomerados com ar incluso, sendo este efeito mais visível para a composição com 30% de metacaulino. Determinou-se uma linearidade entre os valores da resistência das argamassas e a resistência dos respectivos betões, sendo a resistência das argamassas cerca de 84% da resistência das betões correspondentes. As argamassas e betões com diatomite na sua composição, mostraram uma maior diminuição da resistência com o aumento do teor em pozolanas, devido à baixa reactividade pozolânica da diatomite. As argamassas com 40% de ligante não foram tão afectadas pela presença da diatomite mas os betões com apenas 17,5% de ligante mostram uma forte diminuição da resistência de tal forma que nas argamassas e nos betões apenas com diatomite os valores da resistência são idênticos. No entanto, nas composições mistas de metacaulino com um teor fixo de 3% de diatomite, a presença da diatomite continua a não ter influência nos valores da resistência das argamassas enquanto nos betões se verifica uma descida acentuada para os teores de metacaulino menores (5 e 10%) mas, para os teores maiores de metacaulino (15 e 20%) observa-se uma tendência de subida da resistência, devido à elevada reactividade pozolânica do metacaulino. Nas formulações em que a diatomite está presente, não se verifica relação entre os valores da resistência das argamasassas e dos betões correspondentes.

O agente redutor de água de amassadura (SP) como elemento para ajustar a trabalhabilidade das diferentes composições à argamassa padrão, ao adsorver à superfície das partículas nos aglomerados, desaglomerando-as e separando-as, aumenta a reatividade do sistema já que partículas menores são mais reativas que “partículas maiores”. As partículas separadas, devido à sua finura poderão atuar como filler. Deste modo, as argamassas e betões apresentam, em geral, um aumento da resistência à compressão com o aumento do teor em material pozolânico. Relativamente ao metacaulino, devido à sua elevada reatividade pozolânica, o incremento da resistência com o aumento da quantidade de metacaulino é bastante significativa, tanto para as argamassas como para os betões correspondentes, verificando-se uma relação linear entre a resistência das argamassas e a dos betões correspondentes. O valor da resistência das argamassas, em média, é cerca de 84% do valor da resistência dos respetivos betões. Na média anterior não foram consideradas as composições com 25 e 30 % de metacaulino, para as quais a correlação não se verifica, tal como acontecia na análise reológica. Verifica-se uma relação linear entre as resistências das argamassas e as resistências dos respetivos betões.

As composições de argamassas e betões com diatomite, devido á baixa reatividade desta pozolana, não apresentam melhoria da resistência relativamente aos padrões. No entanto, pode-se considerar que a resistência se mantém, com uma correlação entre os valores da resistência das argamassas e os valores da resistência dos betões correspondentes de cerca de 84%, sem considerar a composição com 10% de diatomite que não apresentava correlação reológica para esse valor de material pozolânico. Não se verificou qualquer relação entre as resistências das argamassas e betões correspondentes.

As formulações mistas, devido ao aumento do teor em metacaulino, mantendo a diatomite nos 3%, mostram um aumento dos valores da resistência à compressão, das argamassas e seus betões, com o aumento do teor em metacaulino embora esses valores sejam ligeiramente inferiores aos apresentados pelas composições apenas com metacaulino. Verifica-se uma relação linear entre os valores das resistências das argamassas e as dos betões correspondentes e, o valor da resistência à compressão das argamassas é cerca de 85% do valor da resistência dos betões. Nesta avaliação não foi considerada a formulação com 20% de metacaulino e 3% de diatomite que não tinha apresentado correlação reológica.

4.2.2. Efeito de materiais pozolânicos sobre algumas propriedades no estado endurecido de betões.

Atualmente é amplamente aceite a utilização de materiais pozolânicos, como as cinzas volantes e a microsilica, em substituição parcial do cimento Portland, na produção de argamassas e principalmente de betões. Para além da componente ambiental, na medida que esta substituição leva a uma diminuição da emissão de CO₂, a utilização de pozolanas apresenta imensas vantagens técnicas [Glasser et al 2008].

4.2.2.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de betões com pozolanas.

O teor em água de amassadura é um dos fatores mais influentes na trabalhabilidade do material cimentício em fresco, entendendo-se por trabalhabilidade a facilidade de manuseamento e aplicação de uma argamassa ou um betão, que caracterizam a sua adequação a uma determinada utilização, pois as mais pequenas variações no teor de

água implicam mudanças significativas no comportamento reológico das misturas frescas, o que está diretamente relacionado com a concentração de sólidos da suspensão, ou seja, com a sua densidade [Hiemenz 1977, Fonseca 2000]. No entanto, é importante realçar que nem toda a água presente nas misturas contribui para a porosidade do material final [Feldman et al 1968].

4.2.2.1.1. Introdução de metacaulino

Para além da sílica fumo e das cinzas volantes, o metacaulino (MK) é um dos materiais pozolânicos mais estudado nos últimos tempos. A presença da alumina amorfa, para além da sílica, na sua composição promove reações pozolânicas mais rápidas e, deste modo, os betões conseguem resistências elevadas mais cedo. A Tabela 4.19 mostra a quantidade de hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia do betão padrão e no betão com 30% de metacaulino na sua composição, após 7 e 28 dias de cura, em ambiente controlado de 95% HR e 20°C. A portlandite (Ca(OH)_2) é um produto da reação de hidratação do cimento logo, é normal o aumento do teor em portlandite (Tabela 4.21), no betão padrão dos 7 para os 28 dias. Em contrapartida, as reações pozolânicas consomem hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) promovendo a sua diminuição na matriz cimentícia, tal como se pode observar na Tabela 4.21. A presença da alumina amorfa na composição com 30% de metacaulino promove um decréscimo acentuado da portlandite logo aos 7 dias de cura e, aos 28 dias de cura apenas se encontram 3,7% de hidróxido de cálcio no caso de 30% de metacaulino, relativamente à massa do cimento, no betão. Este decréscimo do teor em portlandite presente no betão, não é apenas importante porque as reações pozolânicas podem aumentar a resistência mecânica do betão mas, também porque a presença da portlandite contribui para a redução da durabilidade pois é um material parcialmente solúvel em água e quimicamente reativo em ambientes ácidos [Wild et al. 1997].

A Figura 4.81 mostra a evolução da resistência à compressão, para betões com diferentes teores em metacaulino, com diversos tempos de cura. O comportamento do módulo de elasticidade dinâmico, para as diferentes formulações, também pode ser observado na Figura 4.81. A trabalhabilidade das composições com metacaulino foi ajustada através da alteração da quantidade de água de amassadura.

Embora se verifique um aumento da resistência à compressão dos betões dos 7 para os 28 dias e ainda para os 7 meses, observa-se sempre uma diminuição da resistência com o aumento do teor em metacaulino. Este decréscimo da resistência está relacionada

com o ar introduzido pelos aglomerados de metacaulino e é corroborado pelo comportamento do módulo de elasticidade que está intimamente relacionado com a densidade dos materiais. Tal como na resistência à compressão, observa-se uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor em metacaulino o que indica um decréscimo da densidade do material com o aumento da quantidade de metacaulino.

Tabela 4.21. Quantidade de Ca(OH)_2 , em betões com metacaulino, calculada a partir de análises térmicas.

Formulação	Tempo de cura (dias)	Teor de Ca(OH)_2 (% peso de cimento)
B_0.6W	7	11,9
B_0.6W	28	15,1
B_20MK_0.70W	28	5,4
B_30MK_0.75W	7	4,4
B_30MK_0.75W	28	3,7

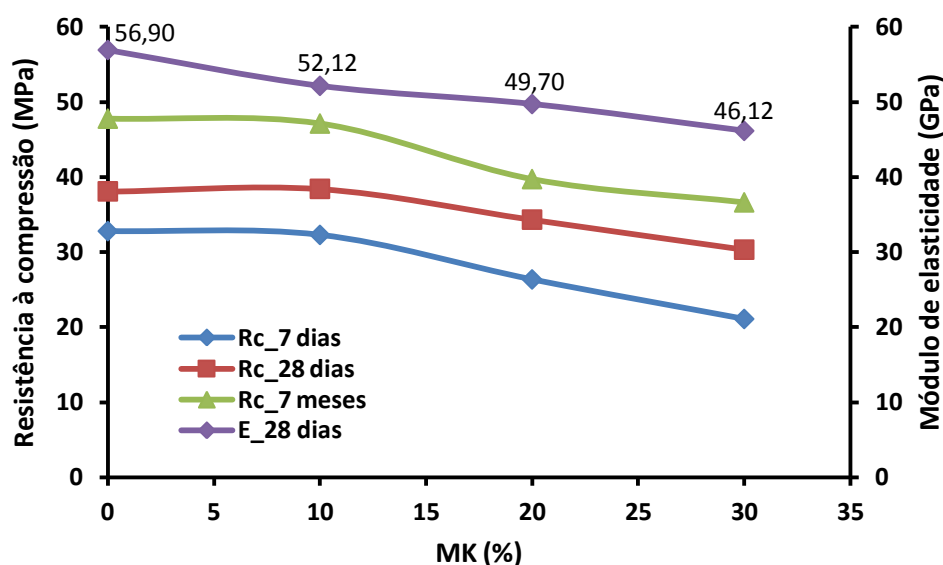


Figura 4.81. Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK e tempo de cura diversos.

A determinação da porosidade e a sua distribuição de tamanhos através de porosimetria de intrusão de mercúrio (Tabela 4.20) confirma os resultados observados na Figura 4.81. Verifica-se um aumento da porosidade total das amostras com o aumento do teor em metacaulino embora o diâmetro médio dos poros diminua. As reações de

hidratação do cimento e as reações pozolânicas ocorrem no interior dos poros capilares o que leva a uma diminuição do seu diâmetro. No entanto, na Tabela 4.22 e na Figura 4.82, a matriz cimentícia do betão padrão, dos 7 para os 28 dias, apresenta uma diminuição do diâmetro médio de poro mas, a porosidade total aumenta. Na reação de hidratação do cimento, os produtos da reação são menos volumosos que os reagentes podendo, desta forma, promover um aumento da porosidade.

O aumento da porosidade total com o aumento do teor em metacaulino deve-se, ao aumento do teor em água e, principalmente ao ar que permanece no interior dos aglomerados pois, o número de aglomerados aumenta com o aumento da quantidade de metacaulino introduzido (Tabela 4.22).

As Figuras 4.83 e 4.84 mostram a distribuição de tamanhos de poros, aos 7 e 28 dias de cura, para a formulação padrão e para as formulações com metacaulino. Aos 7 dias de cura é evidente que as curvas das formulações com metacaulino, quando comparadas com a curva padrão, se desviaram para a zona de menor diâmetro de poros embora, com uma porosidade total superior.

Tabela 4.22. Resultados de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com diferentes teores de MK.

Composições	Diâmetro médio de poro aos 7 dias (μm)	Diâmetro médio de poro aos 28 dias (μm)	Porosidade 7 dias (%)	Porosidade 28 dias (%)
B_0,6W	0,10	0,09	13,65	15,00
B_10MK_0,65W	0,03	0,02	14,47	13,32
B_20MK_0,70W	0,03	0,02	17,15	15,64
B_30MK_0,75W	0,04	0,03	19,21	18,22

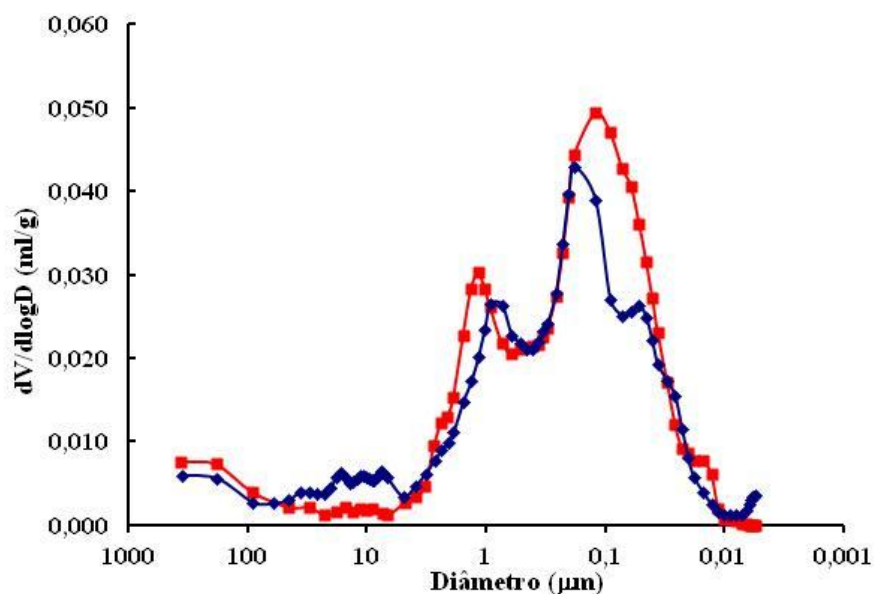


Figura 4.82. Distribuição de tamanho de poros na argamassa padrão aos 7 (azul) e 28 (vermelho) dias.

A alumina presente na composição do metacaulino reage muito rapidamente com a portlandite e assim há uma redução acentuada do diâmetro de poros. O aumento da porosidade deve-se substancialmente ao ar incluído nos aglomerados de metacaulino.

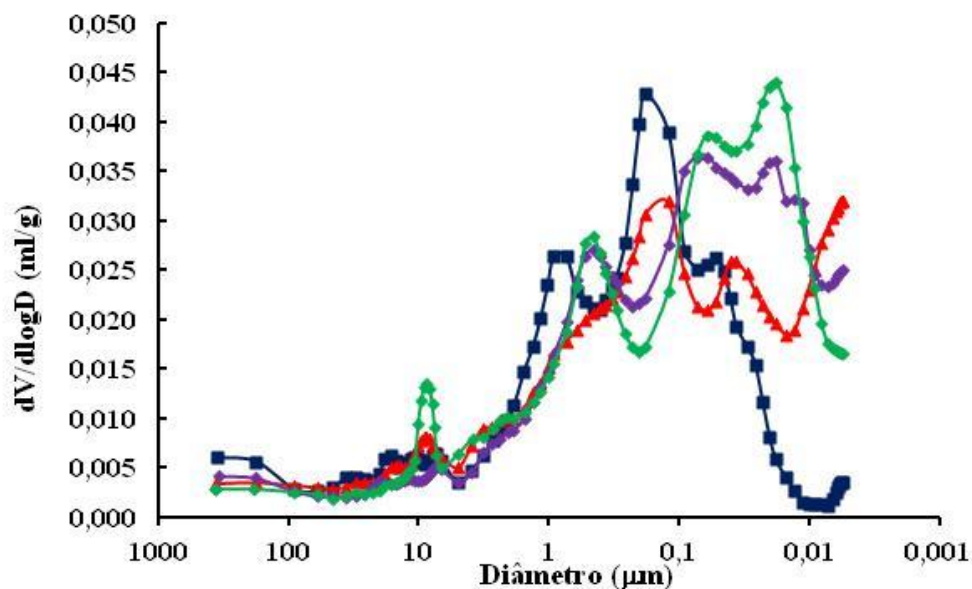


Figura 4.83. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK, aos 7 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK)

Aos 28 dias, nas composições com 10 e 20% de metacaulino, com menor teor em aglomerados, verifica-se uma diminuição da porosidade total e uma diminuição do diâmetro médio de poro relativamente às formulações com 7 dias. Relativamente à composição com 30% de metacaulino também se observa deslocamento da curva para os tamanhos menores mas, a porosidade total ainda se mantém bastante elevada, provavelmente devido à elevada quantidade de aglomerados presentes no metacaulino. O ar incluso nos aglomerados, mesmo após a reação do metacaulino com a portlandite, permanece dentro do betão. Os poros de ar são facilmente identificáveis por microscopia eletrónica de varrimento (MEV) devido à sua forma redonda.

A análise da microestrutura das diferentes amostras foi efetuada usando-se um microscópio eletrónico de varrimento (MEV). Este aparelho permite fornecer rapidamente informação sobre a morfologia e sobre a composição química dos seus componentes. Todas as amostras analisadas por MEV foram submetidas a 28 dias de cura em ambiente controlado. A Figura 4.85 mostra uma imagem, obtida por MEV, de uma amostra da composição do betão padrão. Neste tipo de observação, quanto maior for a massa molecular do componente mais claro esse componente aparece na imagem e, conseqüentemente quanto menor a massa molecular, mais escura é a imagem. Por exemplo, os poros aparecem a negro e o cimento por hidratar apresenta-se muito claro.

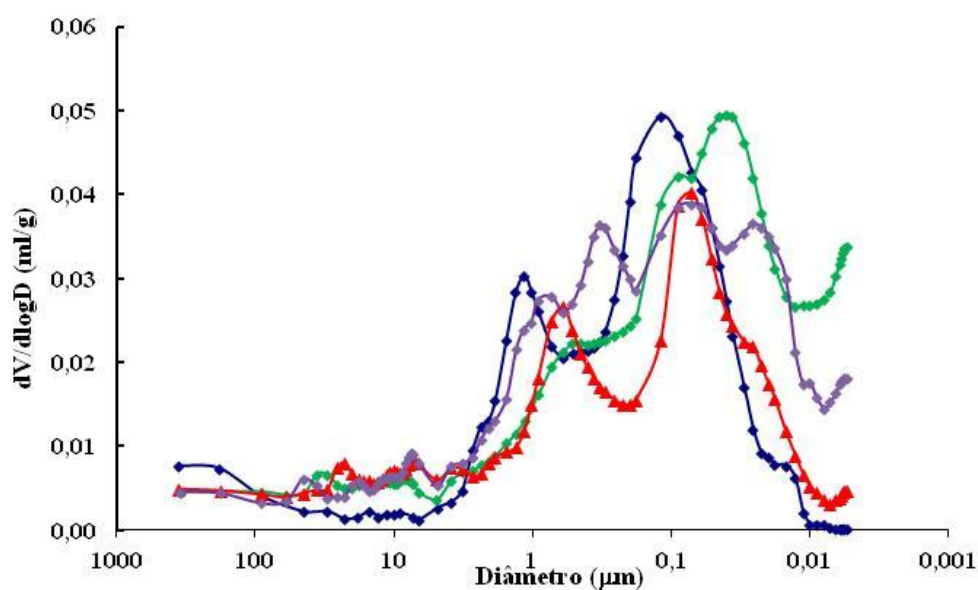


Figura 4.84. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK)

Retomando a observação da Figura 4.85, onde B1 representa a brita mais grossa, B2 a brita bago de arroz, A a areia, C o cimento por hidratar e P a porosidade. A porosidade, neste caso, surge com uma forma bastante arredondada o que sugere que seja devida a ar. As partículas C, mais claras, referem-se a cimento por hidratar. Verifica-se que existem zonas em que a ligação da matriz cimentícia com os agregados é boa mas, no entanto, ao fim de 28 dias, ainda se observa uma grande quantidade de cimento por hidratar.

A Figura 4.86, com maior ampliação, facilita a observação do cimento por hidratar (C). Em algumas dessas partículas é possível observar uma auréola ligeiramente mais escura, em redor da partícula, correspondente a cimento a hidratar.

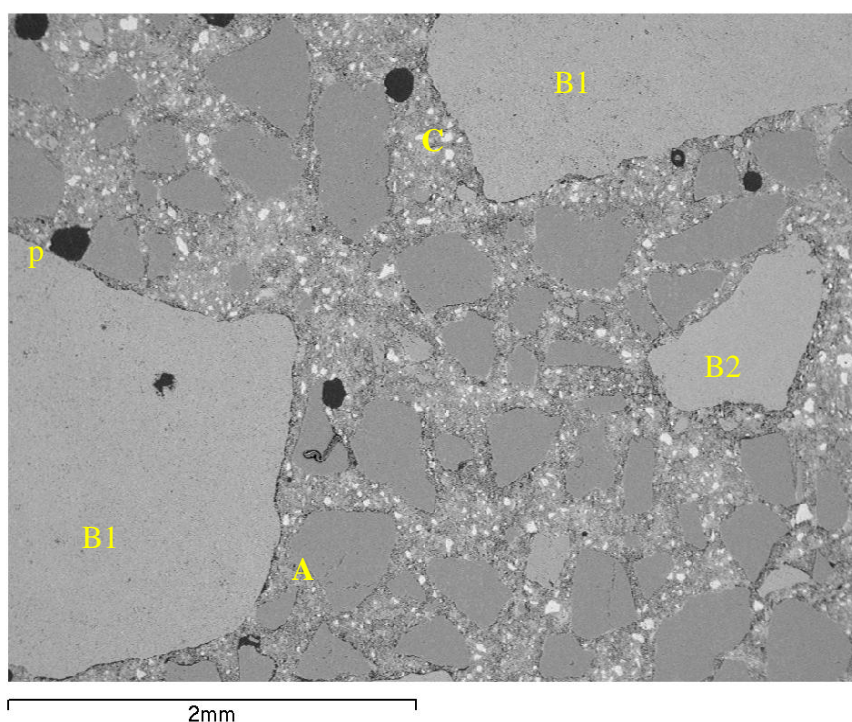


Figura 4.85. Amostra do betão padrão observada por MEV (A- areia; B – brita; C – cimento por hidratar; P – poro).

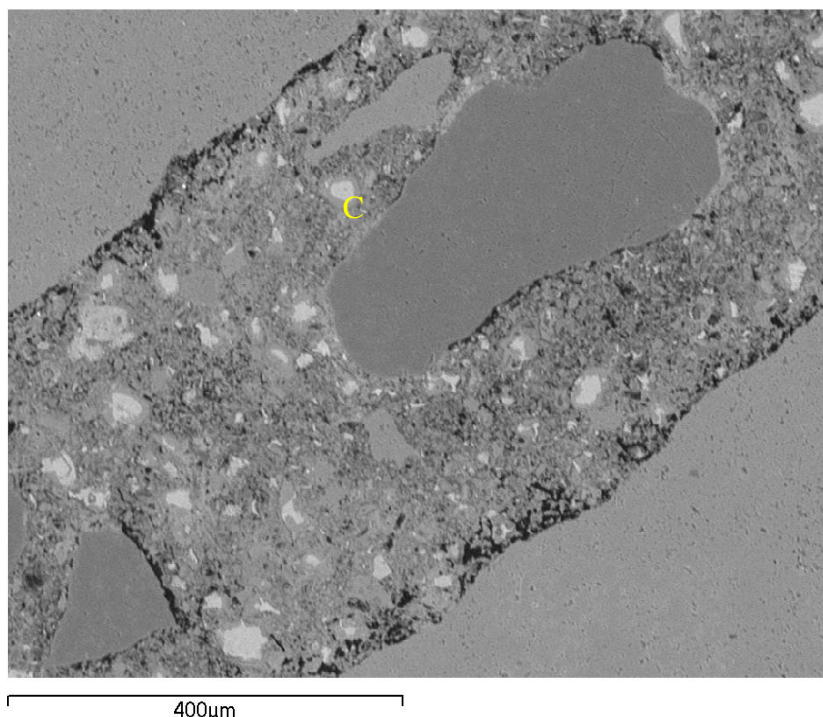


Figura 4.86. Amostra do betão padrão observada por MEV.

A Figura 4.87 mostra outra imagem da amostra padrão, com maior ampliação. Na zona do quadrado a verde que se encontra na Figura 4.87 efetuou-se uma espectroscopia de dispersão de energia (EDS), que permite a determinação da composição elementar da pasta de cimento, que pode ser analisada na Figura 4.88, que mostra que os elementos maioritários na pasta de cimento são o cálcio e o silício, enquanto elementos como o oxigénio e o carbono e a alumina ainda apresentam quantidades representativas. A presença do oxigénio e do carbono deve-se ao facto de no material não termos os elementos isolados, mas sim na forma de óxidos, tal como a sílica (SiO_2) e o carbonato de cálcio (CaCO_3)

Como elementos minoritários surgem o potássio, o ferro, o magnésio e o titânio. O ouro deve-se ao recobrimento da amostra com este material para facilitar a emissão dos eletrões.

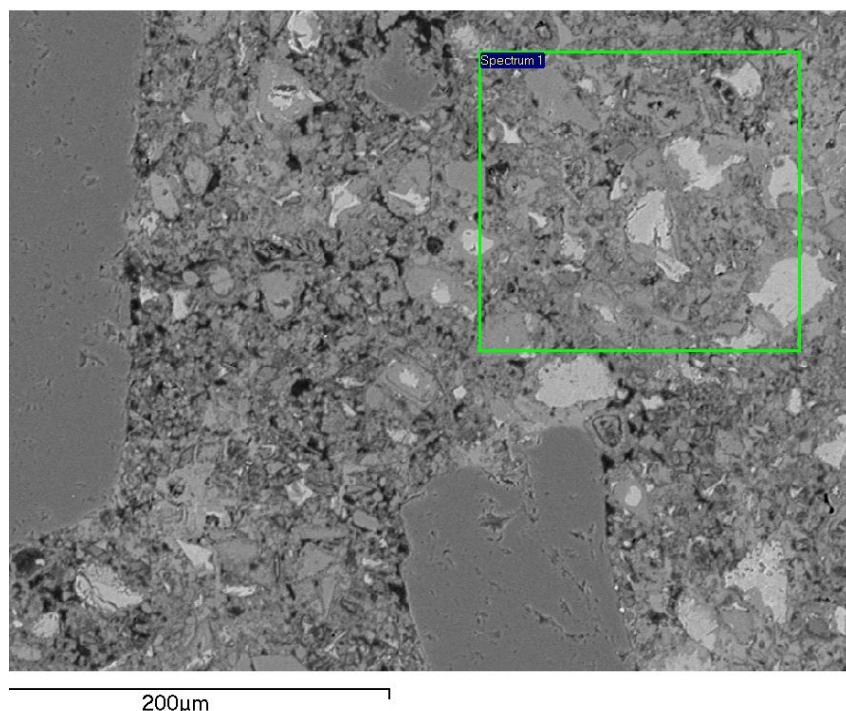


Figura 4.87. Betão padrão com área demarcada da análise por EDS.

Relativamente às amostras com introdução de metacaulino e água para ajuste de trabalhabilidade, as Figuras 4.89 a 4.94 mostram o efeito da presença desta pozzolana com o aumento do teor de água. A observação da Figura 4.89 mostra um aumento do diâmetro e número de poros relativamente ao betão padrão. Alguns desses poros aparentam ser poros de ar a coalescer.

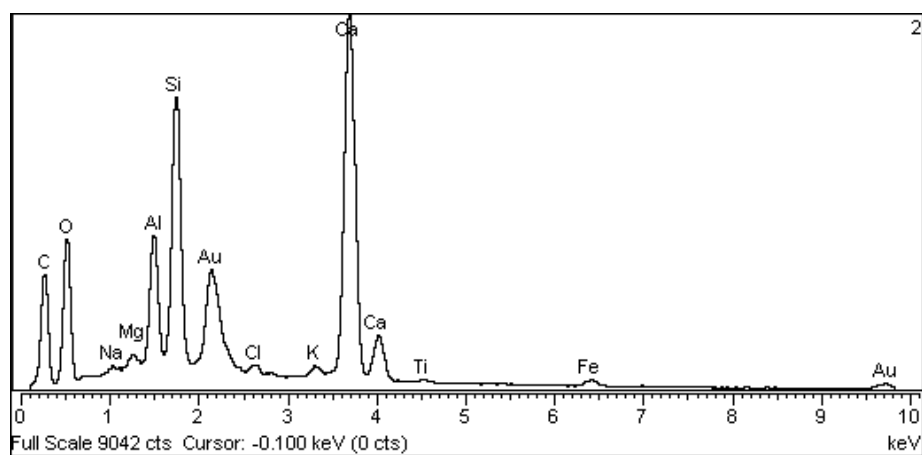


Figura 4.88. Composição da pasta de cimento da amostra padrão.

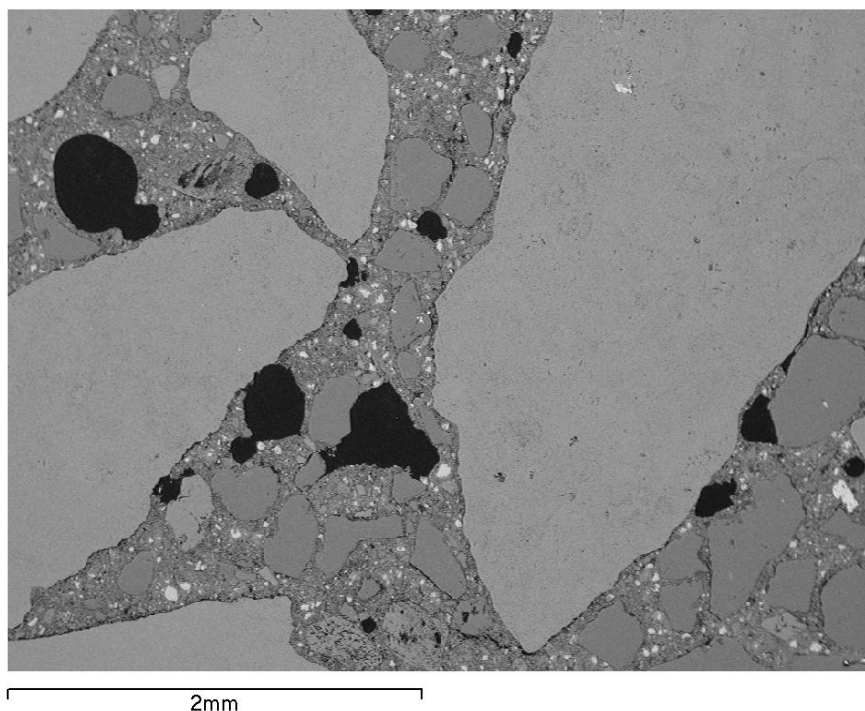


Figura 4.89. Amostra do betão com 20% de MK observada por MEV (barra: 2 mm).

A Figura 4.90 quando comparada com a Figura 4.86, que mostra o betão padrão para a mesma ampliação, mostra a presença de poros de grandes dimensões, que não existiam no betão padrão embora a matriz cimentícia (cimento e metacaulino) se mostre coesa. A Figura 4.91 mostra uma maior ampliação da matriz cimentícia onde pode ser observada uma quantidade significativa de cimento ainda por hidratar.

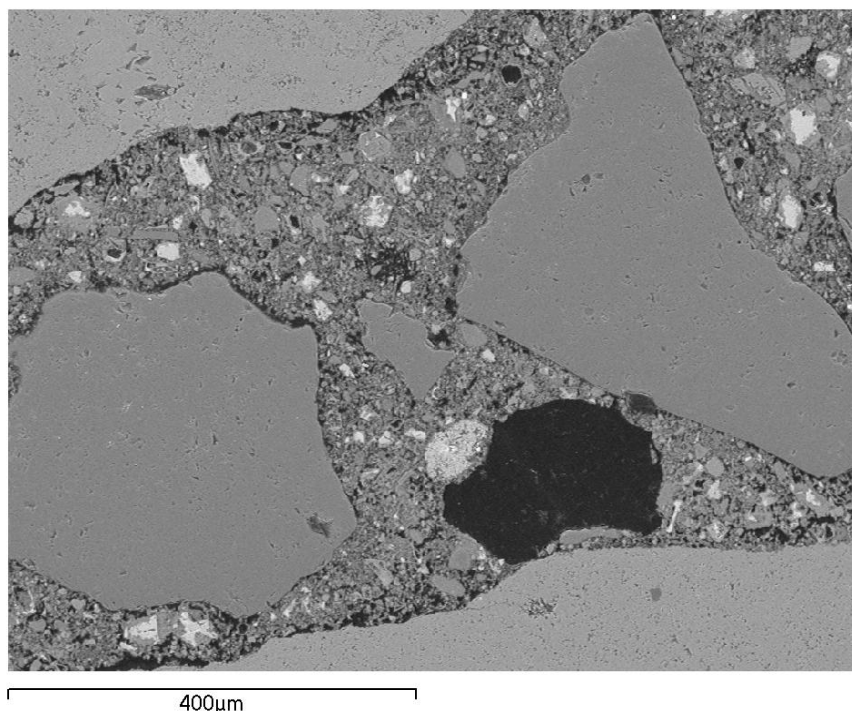


Figura 4.90. Amostra do betão com 20% de MK observada por MEV (barra: 400 μm).

A observação de uma amostra de betão com 30% de metacaulino, apresentada na Figura 4.92, mostra com maior nitidez que a ligação na interface entre a matriz cimentícia e agregados na areia é muito mais frágil do que nas britas. Este efeito deve-se possivelmente à absorção de água pelas britas aproximando desta forma uma maior quantidade de material sólido em seu redor e, se algum material cimentício entrar dentro de alguns poros, reações de hidratação e pozolânicas poderão ocorrer dentro dos poros melhorando a ligação na interface entre as britas e a matriz cimentícia. As areias como não são porosas mostram uma interface com a matriz cimentícia muito mais frágil.

A Figura 4.93, mostra uma quantidade considerável de aglomerados de metacaulino. Dentro da zona demarcada a amarelo, um desses aglomerados, com cerca de 60 microns de comprimento, encontra-se identificado. A Figura 4.94 mostra a análise EDS desse aglomerado que como elementos maioritários apresenta o alumínio e a sílica, confirmando a composição elementar do metacaulino, determinada por fluorescência de raios-X.

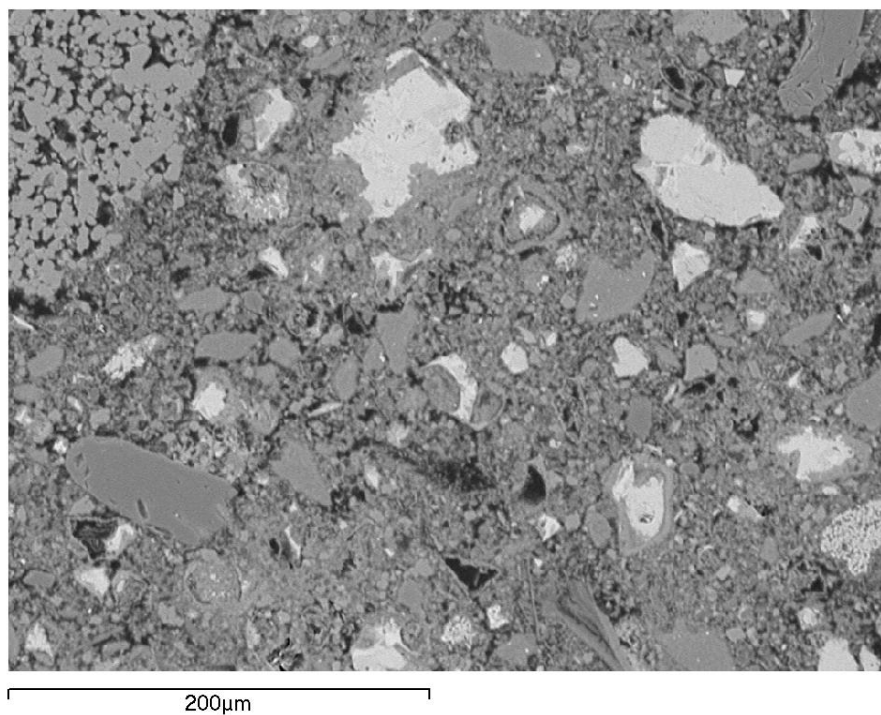


Figura 4.91. Amostra do betão com 20% de MK observada por MEV (barra: 200 μm).

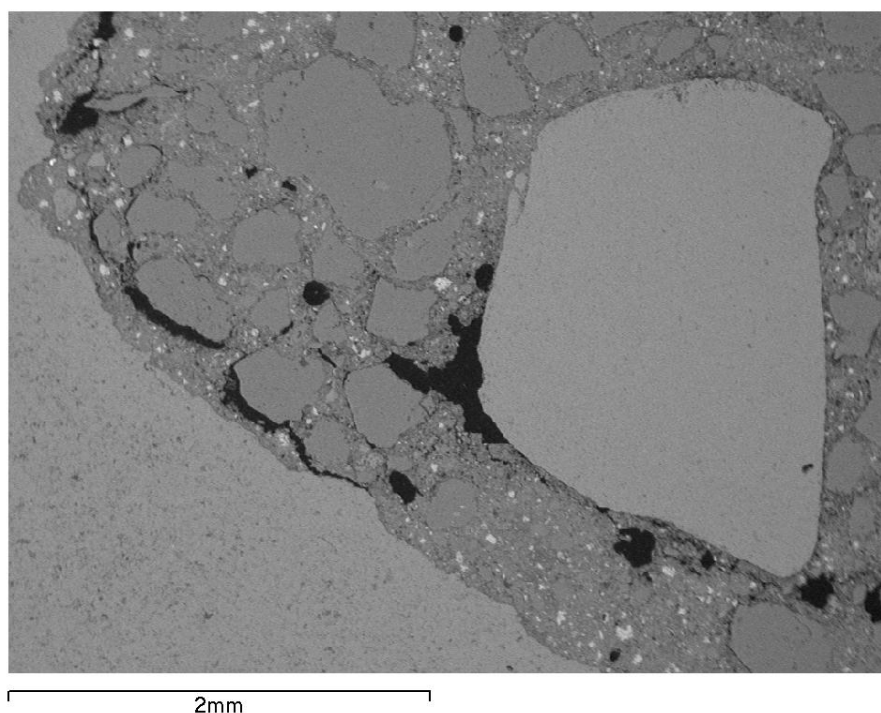


Figura 4.92. Amostra do betão com 30% de MK observada por MEV (barra: 2 mm).

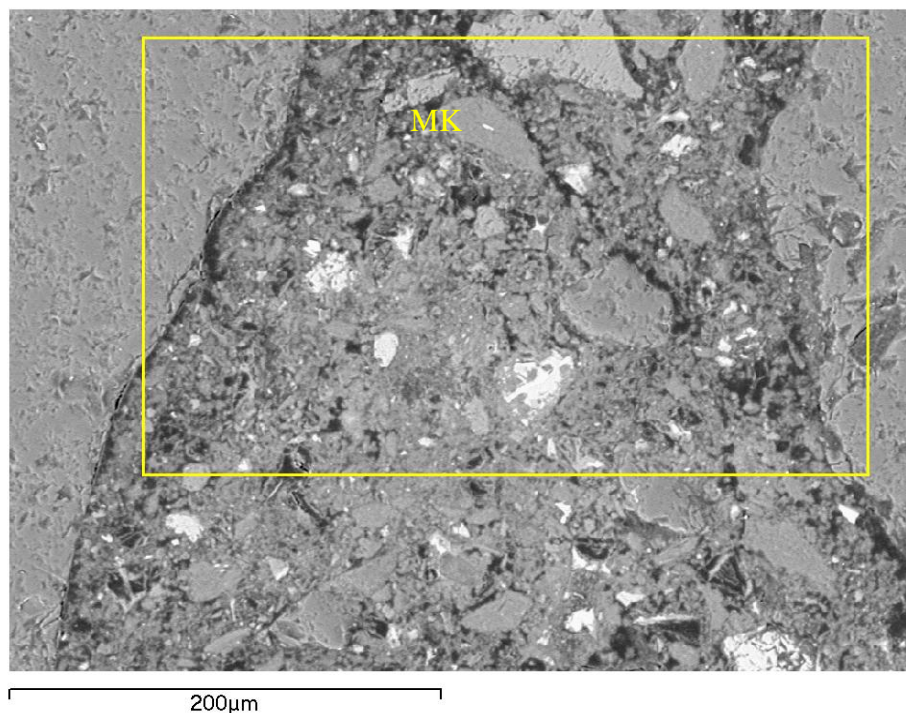


Figura 4.93. Amostra do betão com 30% de MK observada por MEV (barra; 200 μm).

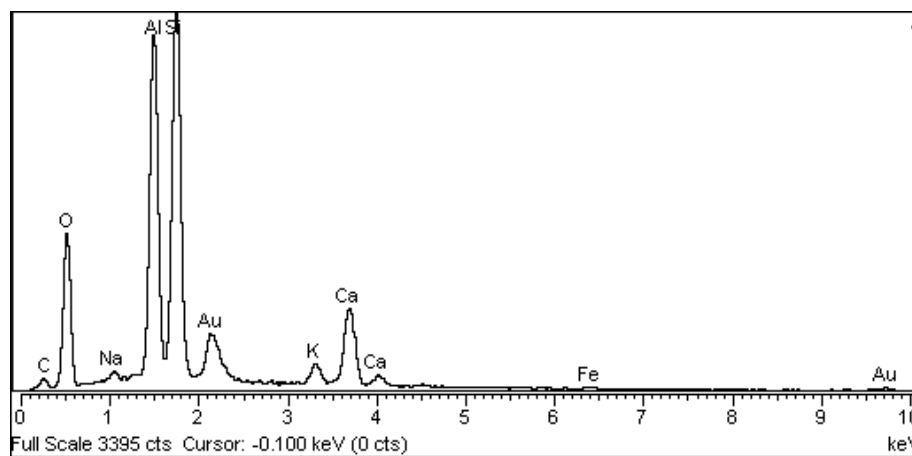


Figura 4.94. Composição do aglomerado de metacaulino.

A Figura 4.95 mostra um mapa de Raios X, efetuado dentro da região demarcada da Figura 4.93, à alumina, à sílica e ao cálcio. No mapa da alumina aparecem zonas de elevada concentração de alumina, correspondentes aos aglomerados de metacaulino. A restante alumina encontra-se disseminada pela matriz cimentícia e provem do cimento.

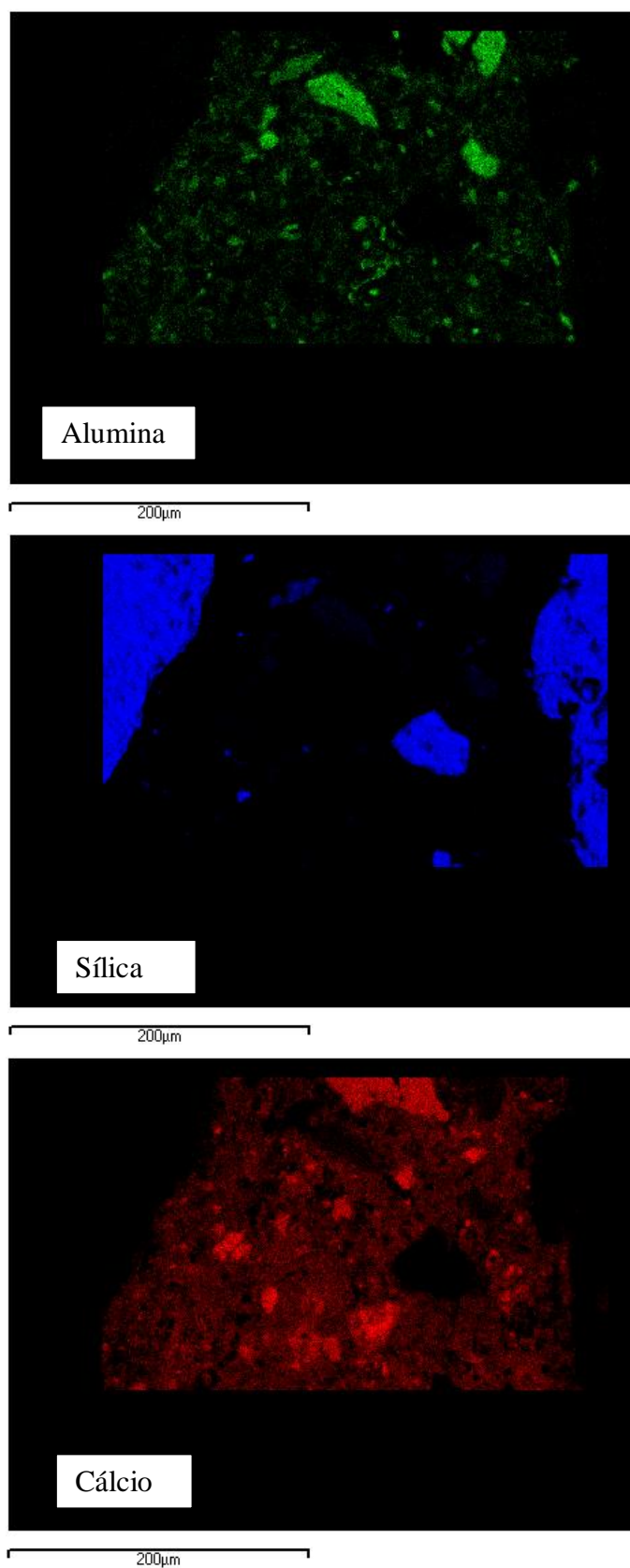


Figura 4.95. Mapa de raios X para a alumina, a sílica e o cálcio, dentro da região demarcada.

No mapa da sílica os agregados são fáceis de detetar, podendo-se concluir que são areias siliciosas (quartzo). Relativamente aos aglomerados de metacaulino, apenas o de maior dimensão é possível de observar. Finalmente, no mapa do cálcio, na zona superior, observa-se uma concentração elevada de cálcio que deve corresponder á brita calcária e, na zona do meio e inferior as maiores concentrações aparentam dever-se a cimento que ainda não hidratou. O cálcio restante encontra-se disseminado pela matriz cimentícia, possivelmente na forma de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) ou associado a produtos de hidratação do cimento.

A Figura 4.96 mostra a espectroscopia de dispersão de energia (EDS), dentro da região demarcada. Apresenta como elementos maioritários o silício e o cálcio, que advêm principalmente da areia e das britas, mas também do cimento. O alumínio deve-se á presença do metacaulino e ao cimento. O oxigénio e o carbono surgem em quantidade considerável para juntamente com a sílica e o cálcio formar a alumina (Al_2O_3) e o carbonato de cálcio (CaCO_3).

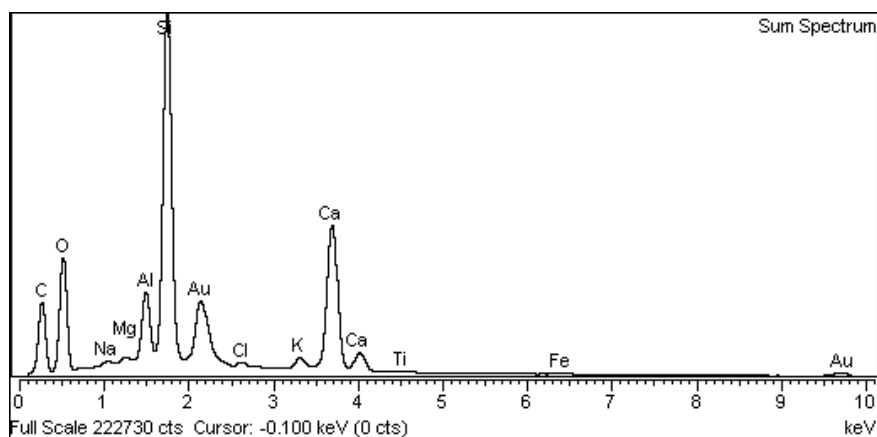


Figura 4.96. Composição elemental da zona demarcada da Figura 4.93.

De acordo com a análise da microestrutura das amostras com metacaulino, justifica-se o observado relativamente aos valores da resistência à compressão e aos resultados obtidos pela porosimetria de mercúrio. A introdução de metacaulino, usando a água para o ajuste de trabalhabilidade, aumenta a porosidade dos betões e consequentemente diminui a sua resistência.

4.2.2.1.2. Introdução de diatomite

Vários estudos confirmam a necessidade de uma maior quantidade de água, para que se obtenha a mesma consistência e o aumento da resistência à compressão pelo menos até 10% de substituição, quando a diatomite é utilizada com material pozolânico [Stamatakis et al 2003, Kastis et al 2006, Yilmaz et al 2008].

Relativamente ao cálculo do consumo de portlandite pela diatomite, como esta não tem alumina amorfa na sua composição e, como já foi anteriormente verificado pelo teste de reatividade pozolânica, a diatomite reage bastante mais tarde que o metacaulino. Por esse motivo, tal como se pode observar na Tabela 4.21, o consumo de portlandite pela diatomite é menor que o verificado nas formulações com metacaulino (Tabela 4.21). A Tabela 4.23 apresenta os resultados obtidos para as formulações com 5, 8 e 10% de diatomite. É possível observar que até aos 28 dias a diatomite reage muito pouco com a portlandite embora, se verifique que o grau da reação aumenta ligeiramente com o aumento do teor em diatomite.

Tabela 4.23. Quantidade de Ca(OH)_2 para betões com diatomite, calculada a partir de análises térmicas.

Formulação	Tempo de cura (dias)	Teor de Ca(OH)_2 (% peso de cimento)
B_0.6W	28	15,1
B_5D_0,67W	28	13,4
B_8D_0,70W	28	12,2
B_10D_0,73W	28	11,1

Tal como se observou para o metacaulino, quando se utiliza a quantidade de água de amassadura para o ajuste de trabalhabilidade, a resistência à compressão diminui com o aumento do teor em diatomite (Figura 4.97). Neste caso, esta diminuição não se deve à incorporação de ar pela diatomite, que facilmente desaglomera, mas sim consequência da elevada quantidade de água necessária para ajustar a trabalhabilidade, devido à elevada porosidade da diatomite. No entanto, verifica-se um incremento da resistência com o aumento do tempo de cura. O módulo de elasticidade dinâmico diminui com o aumento do teor em diatomite, consequência da sua baixa densidade.

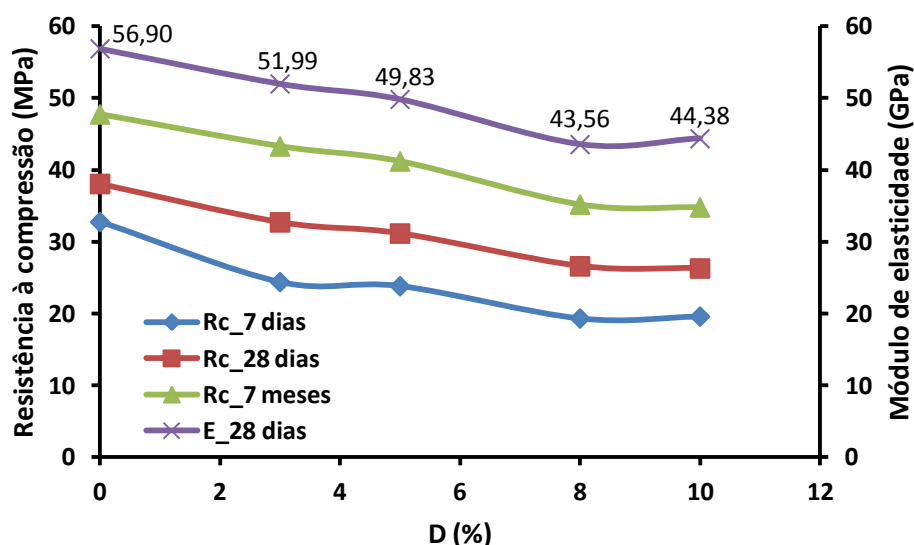


Figura 4.97. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de D e tempo de cura diversos.

Em relação ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, que fornece a distribuição de diâmetros de poros e a porosidade total, a Tabela 4.24 e a Figura 4.98 mostram essas características para a composição do betão padrão e as formulações com 5 e 8 % de diatomite. Verifica-se um aumento do diâmetro médio de poros entre a argamassa do betão padrão e a formulação com 5% de diatomite e também um aumento da porosidade total. A formulação com 8% de diatomite mostra um diâmetro médio de poros menor que o padrão mas a porosidade total é superior. A diminuição do tamanho médio dos poros pode ser consequência da reação pozolânica, que acontece dentro dos capilares, mas a porosidade intrínseca da diatomite mantém a porosidade total elevada.

Tabela 4.24. Resultados obtidos no ensaio de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com introdução de diatomite.

Composições	Diâmetro médio de poro aos 28 dias (μm)	Porosidade aos 28 dias(%)
B_0,6W	0,09	15,10
B_5D_0,67W	0,10	23,92
B_8D_0,70W	0,07	19,24

A Figura 4.98 mostra de uma forma evidente que a formulação com 5% de diatomite, cuja reação com a portlandite é muito pequena, apresenta uma porosidade total

bastante superior embora o tamanho médio de poros não seja muito diferente. A composição com 8% de diatomite apresenta uma distribuição de diâmetro de poros muito próxima da padrão mas mais deslocada para os tamanhos menores e, a sua porosidade total embora bastante menor que a apresentada pela composição com 5% de diatomite, devido a uma maior reação pozolânica, é ligeiramente superior à padrão. Estes resultados parecem demonstrar que a água que se coloca em excesso, para o ajuste de trabalhabilidade, não vai criar mais porosidade na matriz cimentícia. O incremento de porosidade observada aparenta ser devido à porosidade intrínseca da diatomite pois, quando a diatomite começa a reagir com a portlandite, os valores da porosidade diminuem até valores próximos do padrão.

A análise da microestrutura de betões com introdução de diatomite está patente nas Figuras 4.99 a 4.105. A observação da amostra da Figura 4.99 mostra que a quantidade de poros é menor que o observado na amostra com metacaulino, para a mesma ampliação. No entanto, verifica-se uma grande quantidade de cimento por hidratar

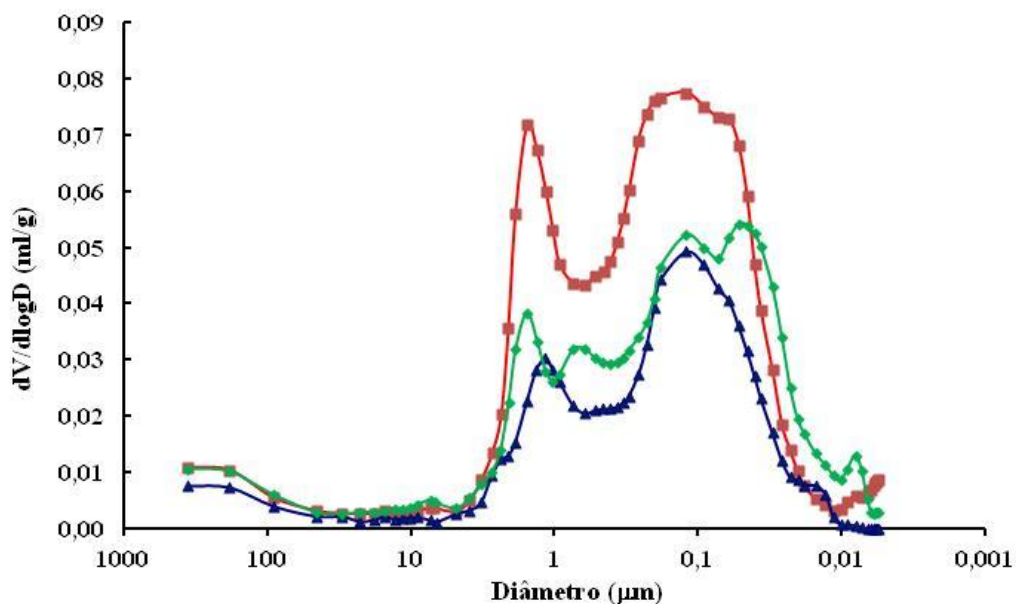


Figura 4.98. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com D, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 5% de D; verde: 8% D)

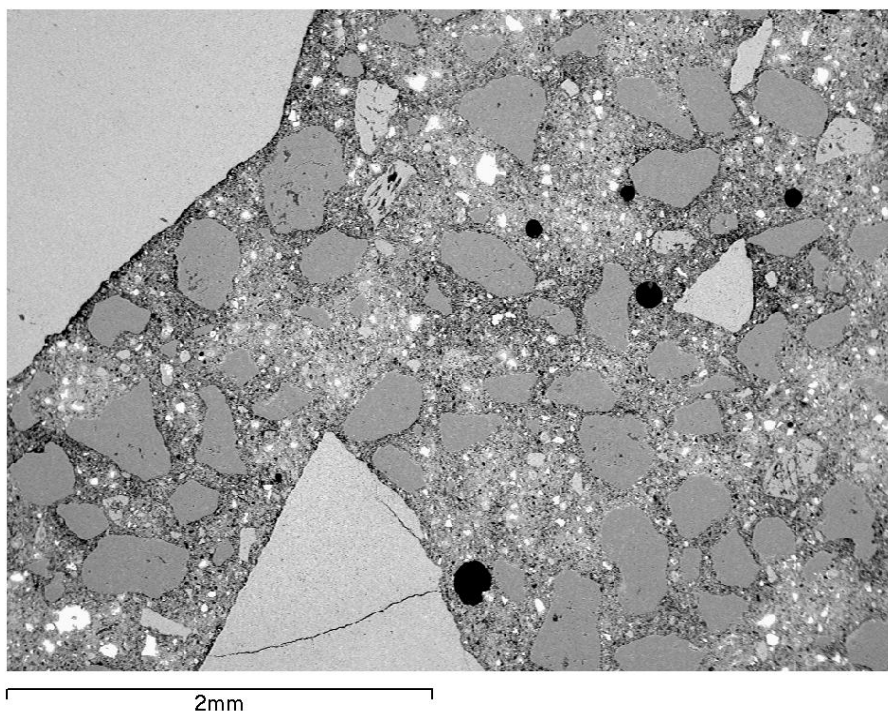


Figura 4.99. Amostra do betão com 8% de diatomite observada por MEV (barra: 2 mm).

A Figura 4.100 confirma uma matriz cimentícia muito pouco densa e com uma ligação muito reduzida aos agregados. Uma ampliação da Figura 4.100 (Figura 4.101) mostra que a matriz cimentícia é extremamente porosa, provavelmente devido à forma irregular das partículas de diatomite que não favorecem a compactação, confirmando os resultados do ensaio de porosimetria que apresentavam um aumento da porosidade na zona de diâmetros de poros mais finos. A observação da figura remete-nos para a zona de interface entre a matriz cimentícia e os agregados. A Figura 4.101 mostra que a diatomite encharcada parece comportar-se como os agregados, criando uma auréola de transição em seu redor que mantém as partículas de cimento afastadas. Tal como na zona interfacial entre matriz e agregado, as partículas estão ligadas apenas por cristais (portlandite nos agregados) perpendiculares à superfície das partículas de diatomite. Tal como nos agregados este comportamento resulta na formação de uma matriz cimentícia altamente porosa [Prokopskia et al 2000, Diamond et al 2001].

Nesta Figura 4.101 foi possível identificar uma partícula de diatomite (assinalada a verde). A análise por EDS efetuada à diatomite (Figura 4.102) confirma os resultados da fluorescência de Raios-X, em que os elementos maioritários são a sílica (81,71%) e o cálcio (7,29%). Na análise EDS o elemento maioritário é o silício, com o cálcio e o

oxigénio em quantidades similares. O carbono aparece como elemento minoritário para a formação de alumina e carbonato de cálcio.

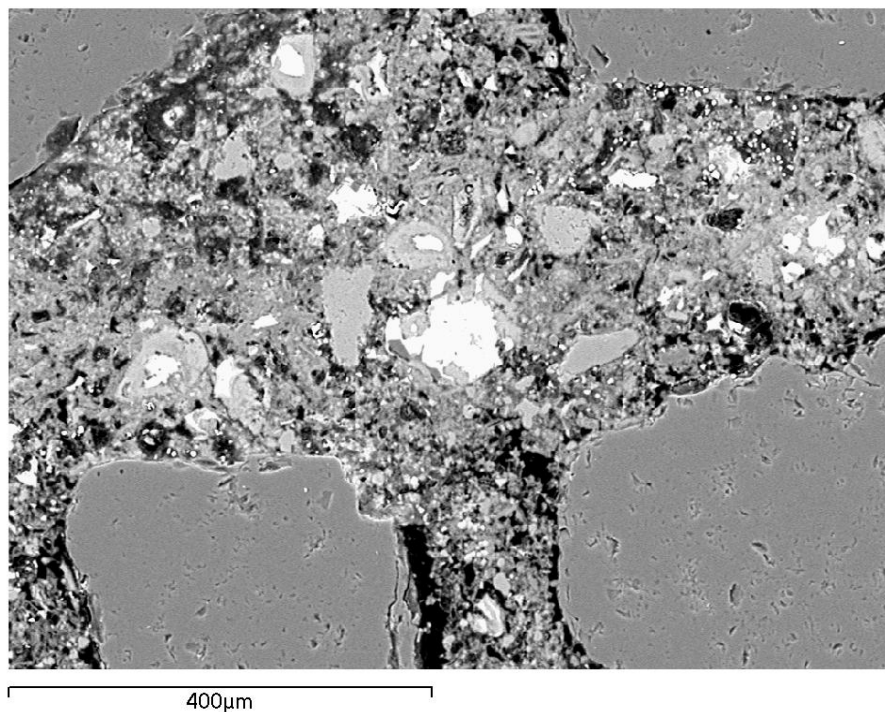


Figura 4.100. Amostra do betão com 8% de diatomite observada por MEV(barra: 400 µm).

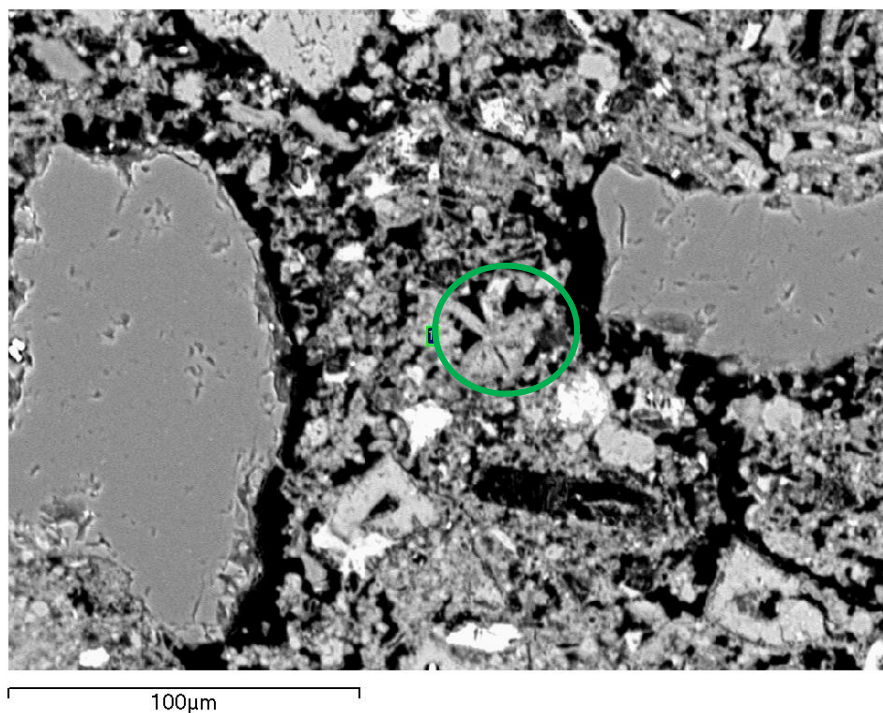


Figura 4.101. Amostra de betão com 8% de diatomite observada por MEV (barra: 100 µm).

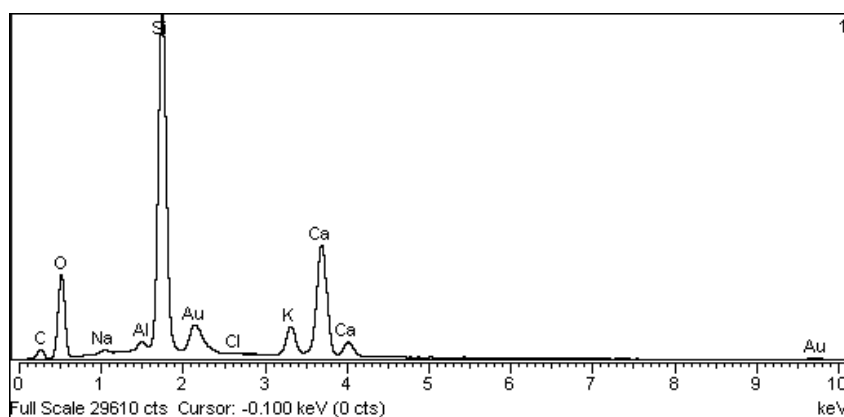


Figura 4.102. Análise de EDS da diatomite.

A Figura 4.103 apresenta uma outra da amostra de betão com 8% de diatomite. Na zona demarcada a verde efetuou-se uma análise de EDS à matriz cimentícia (Figura 4.104). Esta análise mostra como elementos maioritários a sílica e o cálcio. O oxigénio e o carbono apresentam quantidades intermédias para a formação da sílica e do carbonato de cálcio. O sódio, a alumina, o ferro e o potássio aparecem como elementos minoritários.

A amostra de betão com 5% de diatomite analisada por MEV pode ser observada na Figura 4.105. Comparando esta amostra com a amostra de betão com 8% de diatomite com a mesma ampliação (Figura 4.103), não se verificam diferenças significativas na densidade das duas amostras. Este facto confirma os resultados obtidos para os valores obtidos para a resistência mecânica. A resistência à compressão de betões com introdução de diatomite, usando a água para ajuste de trabalhabilidade, baixa com o aumento do teor em diatomite devido a um aumento da porosidade, à falta de coesão da matriz cimentícia e também devido á falta de ligação da matriz com os agregados.

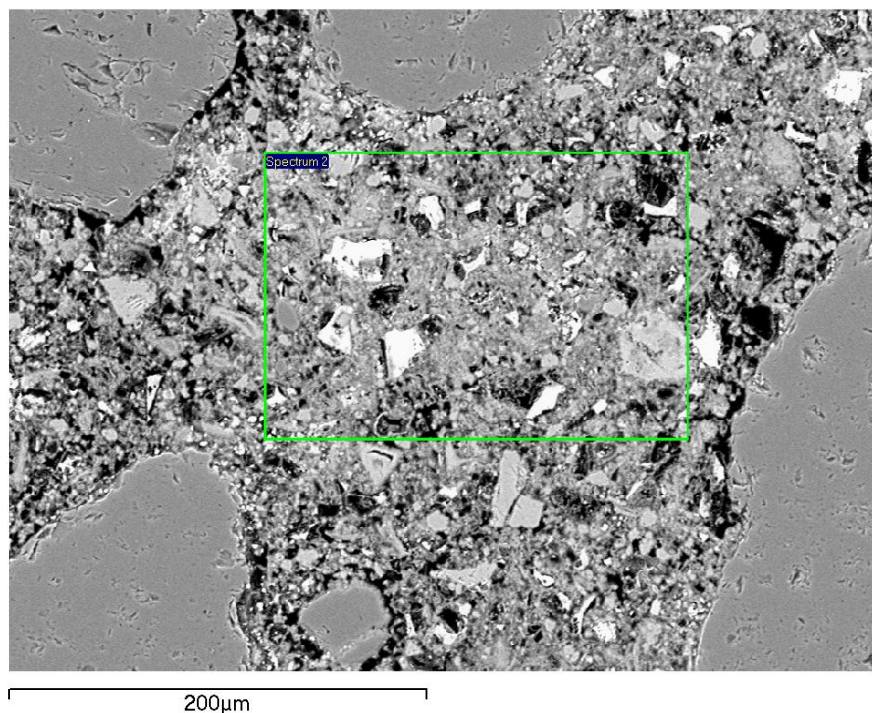


Figura 4.103. Amostra do betão com 8% de diatomite observada por MEV (barra: 200 μm).

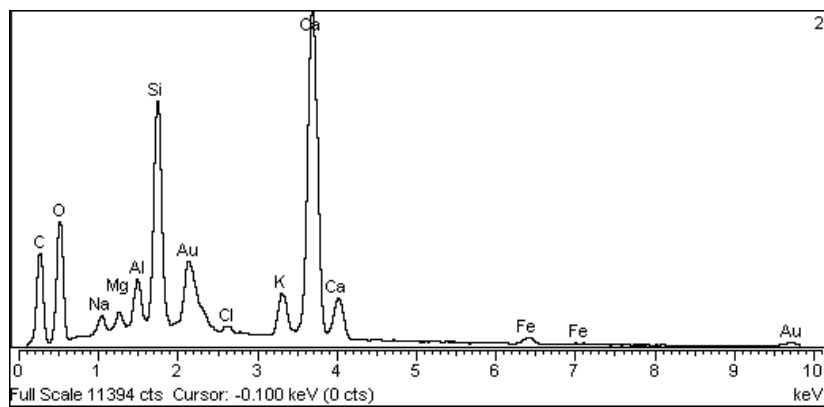


Figura 4.104. EDS da matriz cimentícia na região demarcada.

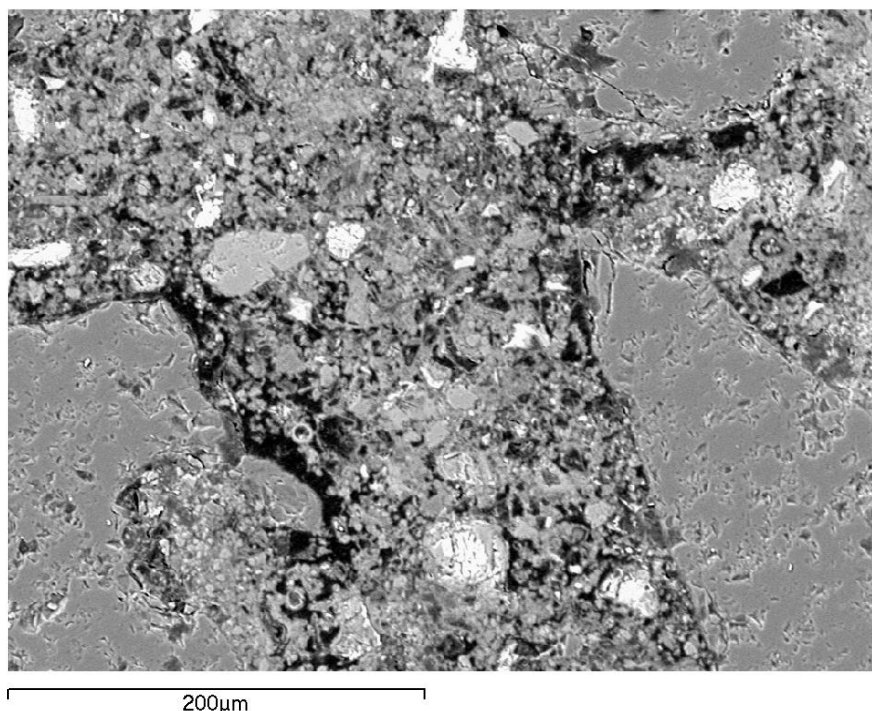


Figura 4.105. Amostra do betão com 5% de diatomite observada por MEV.

4.2.2.1.3. Introdução conjunta de metacaulino e diatomite

Relativamente às formulações mistas de metacaulino com diatomite, a Tabela 4.25 mostra os resultados do teor em portlandite calculados a partir de análises térmicas, para as formulações com 5 e 20% de metacaulino, mantendo a quantidade de diatomite fixa nos 3%. É visível a diminuição do hidróxido de cálcio com o aumento do teor em metacaulino nas formulações, o que confirma a baixa reatividade da diatomite, pelo menos até aos 28 dias de cura.

Tabela 4.25: Quantidade de Ca(OH)_2 , para betões com MK e D, calculada a partir de análises térmicas.

Formulação	Tempo de cura (dias)	Teor de Ca(OH)_2 (% peso de cimento)
B_0.6W	28	15,1
B_5MK_3D_0,67W	28	13,1
B_20MK_3D_0,75W	28	6,5

Confirma-se que a utilização de água para ajuste de trabalhabilidade induz uma diminuição da resistência mecânica com o aumento do teor em material pozolânico (Figura 4.106). No entanto, é interessante verificar que, com o aumento da quantidade de metacaulino, esse decréscimo, inicialmente muito acentuado, diminui e, os valores da resistência, aos 28 dias e 7 meses, quase que se mantêm constantes. Este efeito deve-se ao aumento do teor em metacaulino cuja reatividade pozolânica é bastante elevada embora, por outro lado, aumente a introdução de ar incluso nos aglomerados. O módulo de elasticidade dinâmico (28 dias) acompanha a evolução da resistência, com uma diminuição relativamente ao padrão, devido principalmente ao ar introduzido pelos aglomerados de metacaulino.

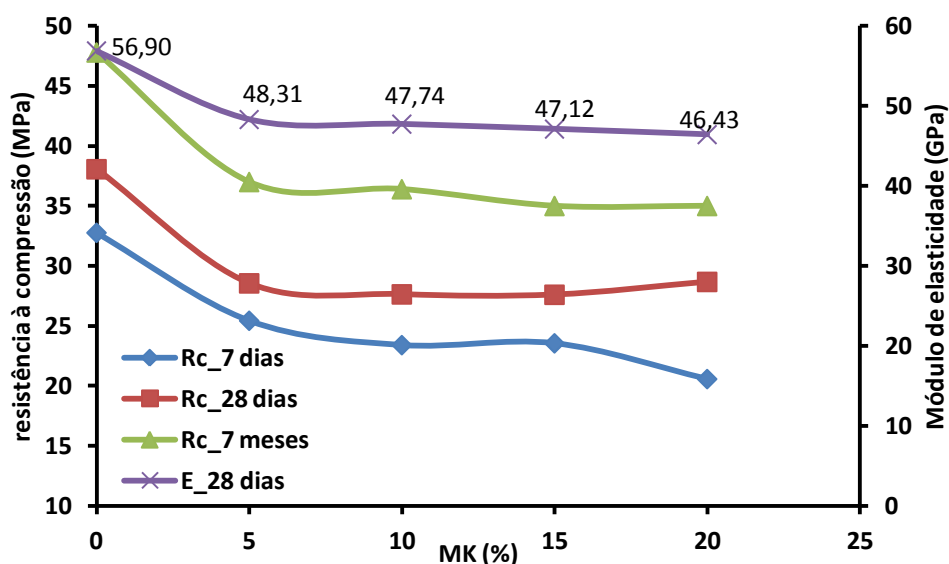


Figura 4.106. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK, 3% de D e tempo de cura diversos.

Relativamente ao ensaio de porosimetria de intrusão de mercúrio, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.26, verifica-se que com o aumento da quantidade de metacaulino, dado que a quantidade de diatomite é fixa nos 3%, incrementa a porosidade total devido ao ar incluso dentro dos aglomerados. No entanto, o diâmetro médio de poro diminui com o aumento em metacaulino como consequência de uma maior reação entre o metacaulino e a portlandite.

A Figura 4.107 mostra de forma bastante evidente o aumento da porosidade total com a introdução de 20% de metacaulino e 3% de diatomite, aumentando os picos de

porosidade nos poros maiores e nos poros menores, para valores muito elevados. No entanto, este efeito do aumento de porosidade é compensado pelas reações pozolânicas do metacaulino, cujos produtos da reação incrementam a resistência do betão.

A amostra de betão com 20% de metacaulino e 3% de diatomite, observada por microscopia eletrónica de varrimento, presentes nas Figuras 4.108 a 4.110, numa primeira abordagem com pequena ampliação, mostra alguns poros, principalmente junto aos agregados (Figura 4.108).

Tabela 4.26: Resultados de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com introdução de metacaulino e diatomite.

Composições	Diâmetro médio de poro aos 28 dias(μm)	Porosidade aos 28 dias (%)
B_0,6W	0,04	8.56
B_5MK_3D_0,67W	0,06	21,47
B_20MK_3D_0,75W	0,04	27.77

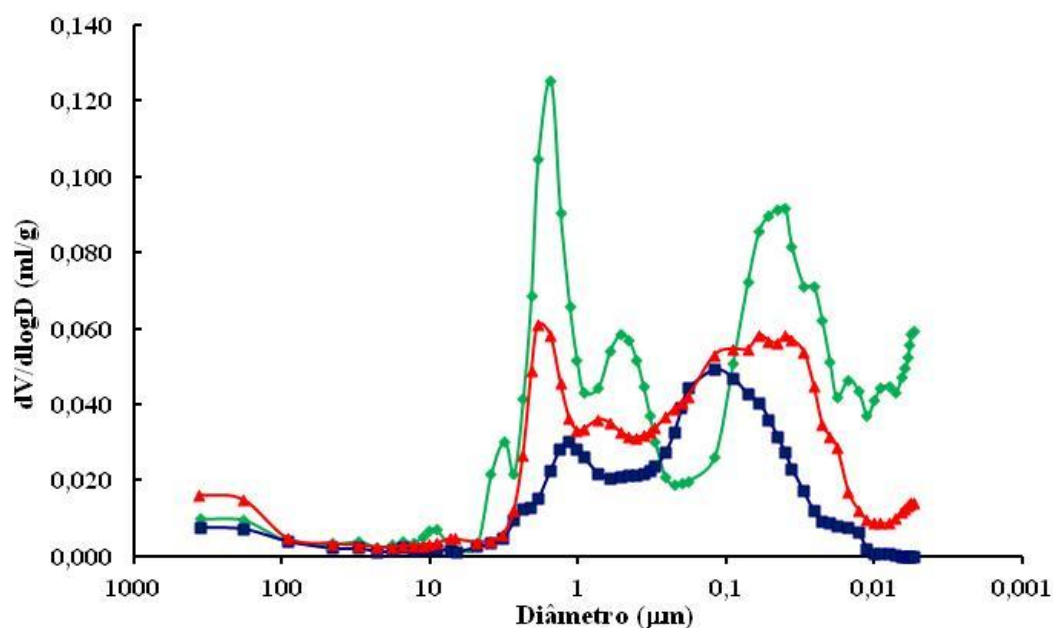


Figura 4.107. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK variável e 3% D, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 5% MK; verde: 20% MK).

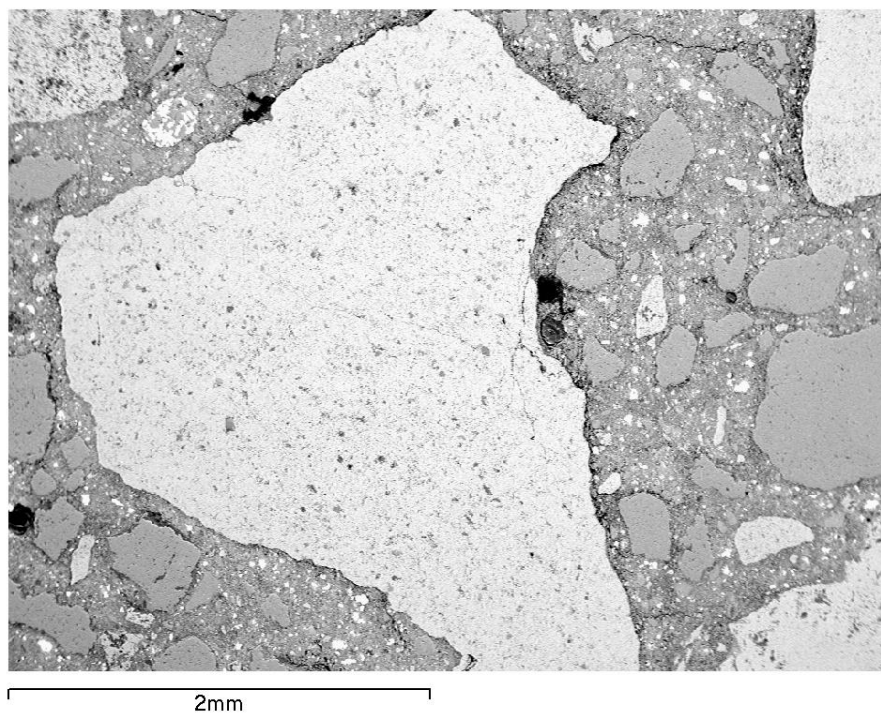


Figura 4.108. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D observada por MEV (barra: 2 mm).

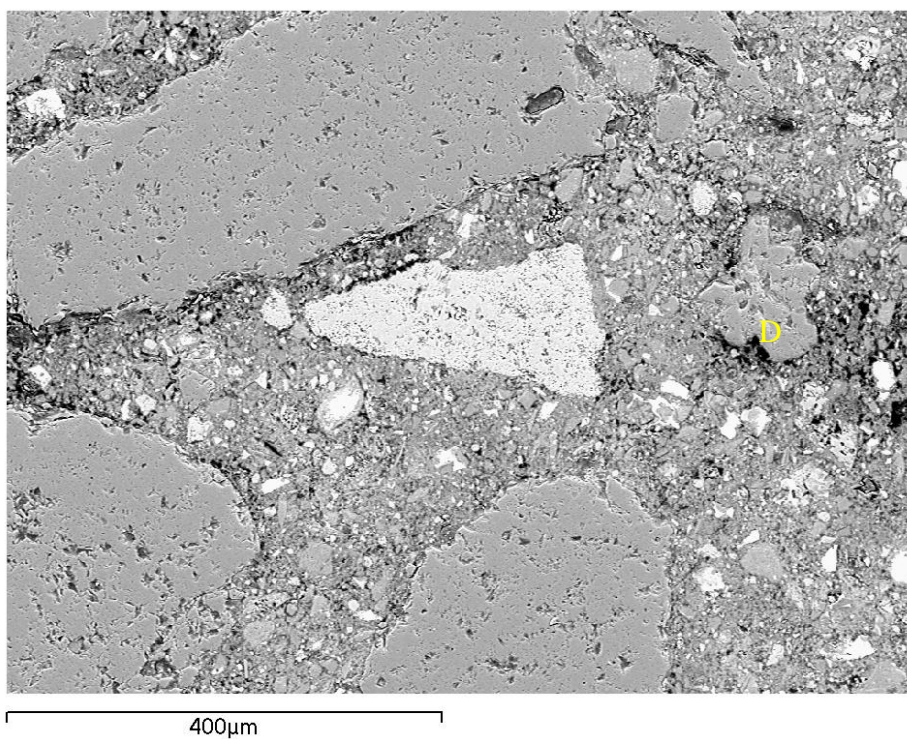


Figura 4.109. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D observada por MEV (barra: 400 µm).

Aumentando a ampliação (Figura 4.109), verifica-se que a densidade na interface entre matriz e agregado apresenta-se menor que no interior da matriz. Especificamente, na proximidade de uma partícula de diatomite (D), observa-se uma redução elevada da densidade do material. A Figura 4.110, com maior ampliação, mostra que a densidade na interface entre a matriz e o agregado é muito baixa contribuindo para uma ligação reduzida e para um valor de porosidade elevado.

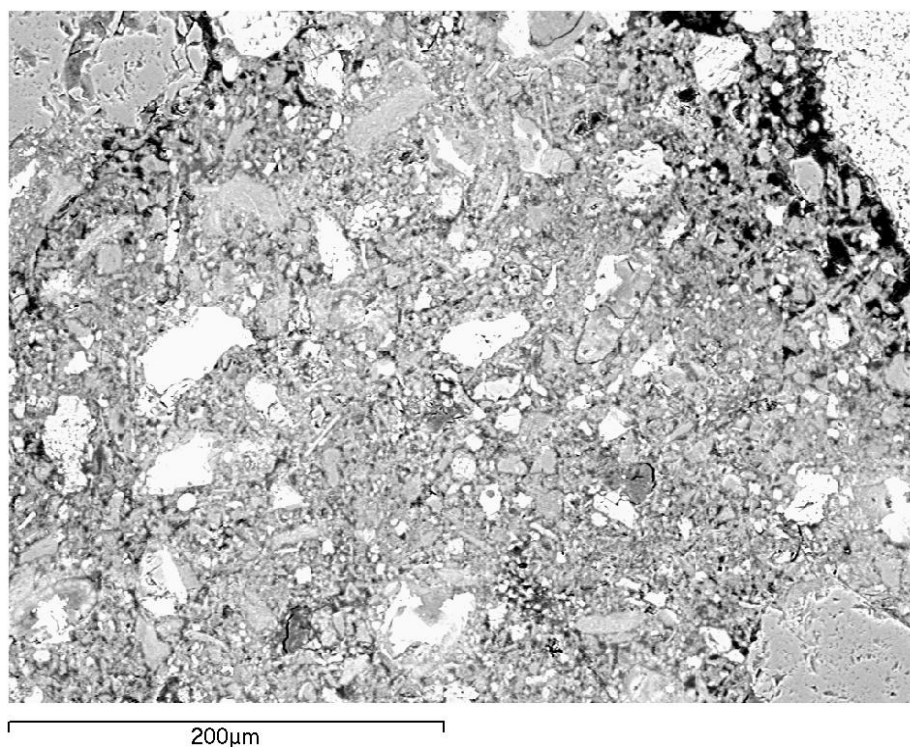


Figura 4.110. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D observada por MEV (barra: 200 μm).

4.2.2.2. Efeito de um agente redutor de água de amassadura sobre o comportamento em endurecido de betões com pozolanas.

Em muitos estudos sobre o efeito de materiais pozolânicos sobre as características das argamassas e dos betões pode-se verificar que os autores utilizam plastificantes ou superplastificantes de forma a controlar a quantidade de água de amassadura e consequentemente a trabalhabilidade dos sistemas [Sensale 2006].

4.2.2.2.1. Introdução de metacaulino

Wild and Khatib consideram que o metacaulino é um material pozolânico diferente dos outros, não só devido à sua elevada reatividade pozolânica, ou seja, à sua capacidade de reagir com teores elevados de portlandite a grande velocidade, mas também pela sua capacidade de acelerar a hidratação do cimento [Wild et al 1996].

A utilização do agente redutor de água de amassadura, normalmente denominado superplastificante (SP), para o ajuste de trabalhabilidade, promove a dispersão parcial dos aglomerados e separa as partículas de metacaulino e cimento. A dispersão dos aglomerados não é completa porque a quantidade de superplastificante utilizada é apenas aquela que coloca o abaixamento de cone de Abrams, dos diferentes betões, dentro do intervalo de trabalhabilidade pretendido (8 a 10 cm). A Tabela 4.27 mostra que essa separação das partículas incrementa a reação pozolânica com a portlandite pois, a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente nas formulações com metacaulino e superplastificante é substancialmente menor que a apresentada pelas composições com metacaulino cujo ajuste de trabalhabilidade foi efetuado através da alteração da quantidade de água de amassadura.

Tabela 4.27. Teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para betões com MK e SP, calculado a partir de análises térmicas.

Composição	Tempo de cura (dias)	Teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (% em peso de cimento)
B_0.6W	7	11.9
B_0.6W	28	15.1
B_20MK_0,6W_0,15SP	28	2.9
B_30MK_0,6W_0,20SP	7	5.5
B_30MK_0,6W_0,20SP	28	1.6

Este efeito de aceleração das reações pozolânicas é visível nos valores obtidos para a resistência à compressão destas composições. A Figura 4.111 mostra que a resistência, para diferentes tempos de cura, aumenta sempre com o aumento do teor em metacaulino. A composição com 30% de metacaulino, aos 7 meses, mostra um valor de resistência de 50 MPa. No entanto, embora a resistência aumente, o módulo de elasticidade continua a diminuir com o aumento da quantidade de metacaulino. Este facto deve-se ao ar ainda presente nos aglomerados remanescentes que aumentam com o aumento do teor em metacaulino.

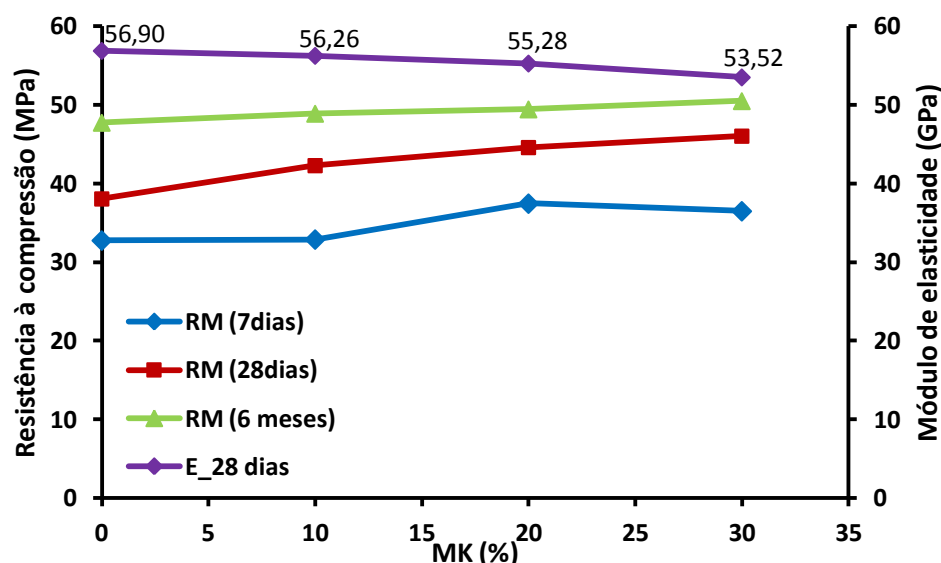


Figura 4.111. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK e SP em tempo de cura diversos.

A dispersão provocada pelo superplastificante também tem consequências sobre a porosidade total e sobre a distribuição do diâmetro médio dos poros. É possível observar, na Tabela 4.28, aos 7 dias de cura, que embora o tamanho de poro médio não altere significativamente, quando comparadas com as composições ajustadas com água, a porosidade total é bastante menor. A diminuição da porosidade total é devida ao aumento das reações pozolânicas. O silicato de cálcio hidratado, na forma de gel, penetra nos poros promovendo um refinamento da porosidade [Spoon et al 2006]. Simultaneamente as partículas menores, podendo-se considerar um aglomerado como uma partícula efetivamente maior, também podem atuar como filler, ou seja, preencher os poros mais finos.

Tabela 4.28: Resultados obtidos de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 7 e 28 dias para betões com diferentes teores de MK e SP.

Composições	Diâmetro médio de poro aos 7 dias (µm)	Diâmetro médio de poro aos 28 dias (µm)	Porosidade 7 dias (%)	Porosidade 28 dias (%)
B_0,6W	0,10	0,09	13,65	15,00
B_10MK_0,6W_0,10SP	0,03	0,02	12,89	10,02
B_20MK_0,6W_0,15SP	0,03	0,02	13,32	10,08
B_30MK_0,6W_0,20SP	0,04	0,02	13,19	11,93

A diminuição da porosidade total está patente na Figura 4.112 que mostra a distribuição do diâmetro das partículas para as diferentes formulações com metacaulino e superplastificante.

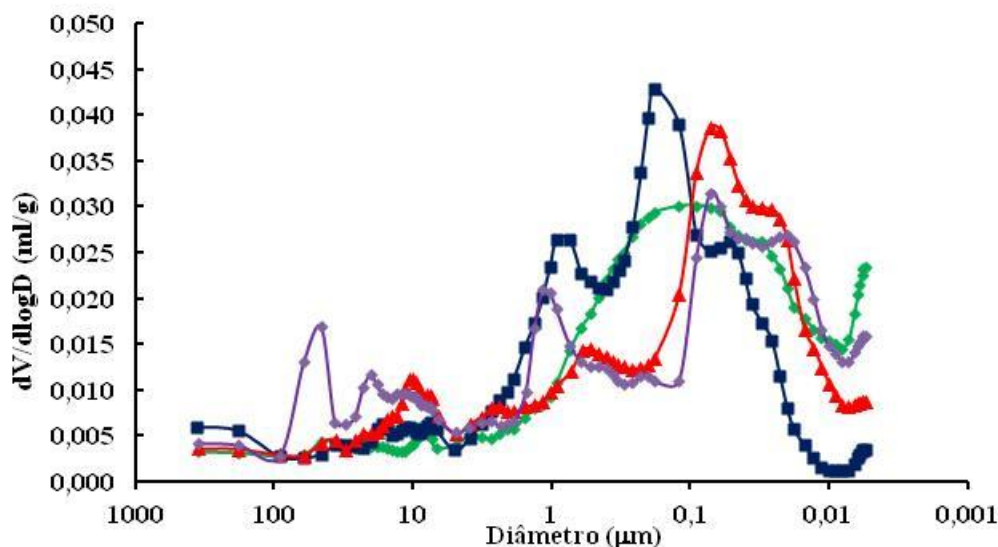


Figura 4.112. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK e SP, aos 7 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK)

Aos 28 dias, a distribuição de diâmetros de poros, para as diferentes composições, apresenta ainda uma maior diminuição da porosidade total, consequência da evolução das reações de hidratação do cimento e das reações entre o metacaulino e a portlandite (Figura 4.113).

A Figura 4.114 mostra uma amostra de betão com 20% de metacaulino, observada por microscopia eletrónica de varrimento, cuja trabalhabilidade foi ajustada através da utilização de um agente redutor de água de amassadura. Comparando com a amostra de betão também com 20% de metacaulino mas com acerto de trabalhabilidade alterando o teor em água (Figura 4.89), verifica-se uma diminuição evidente do número e do tamanho dos poros. A ligação entre a matriz cimentícia e os agregados também parece ser mais forte. A Figura 4.115 mostra uma imagem mais ampliada da mesma amostra de betão. Confirma-se uma ligação mais densa na interface entre a matriz cimentícia e os agregados. A separação das partículas de cimento e metacaulino, devido à presença do superplastificante, aumentou a reatividade desses materiais incrementando as reações de hidratação e pozolânicas. Como as britas foram adicionadas secas, verifica-se uma grande

probabilidade de existir uma concentração de cimento e pozolana em redor desses agregados logo, um incremento das reações de hidratação e pozolânicas aumenta a densidade na zona de interface entre a matriz e o agregado.

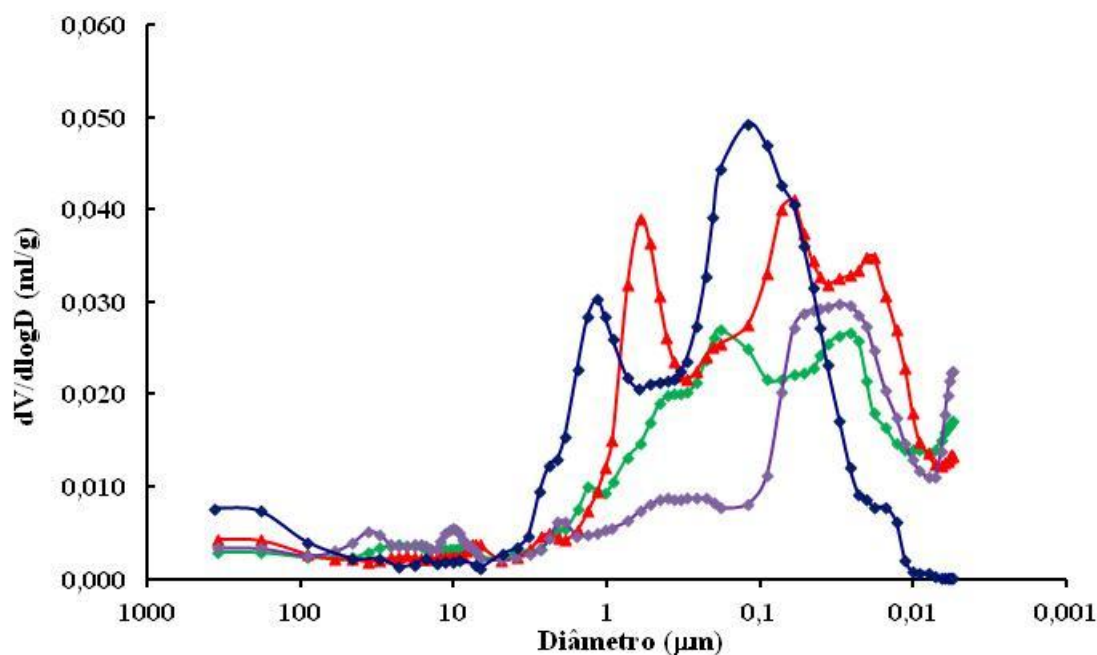


Figura 4.113. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas com MK e SP, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 10% MK; roxa: 20% MK; verde: 30% MK).

A Figura 4.116 mostra aglomerados de metacaulino. Como a quantidade de agente redutor de água de amassadura, para cada composição, é apenas aquela que garante a trabalhabilidade pretendida, essa quantidade não é suficiente para desaglomerar todo o metacaulino. Os aglomerados de metacaulino encontram-se assinalados a amarelo. Comparando com o betão com 20% de metacaulino e ajuste de trabalhabilidade com água, os aglomerados de metacaulino, no betão com superplastificante, apresentam muito menores dimensões. A ampliação utilizada para observar esta amostra mostra a elevada densidade obtida com a utilização do metacaulino simultaneamente com o superplastificante.

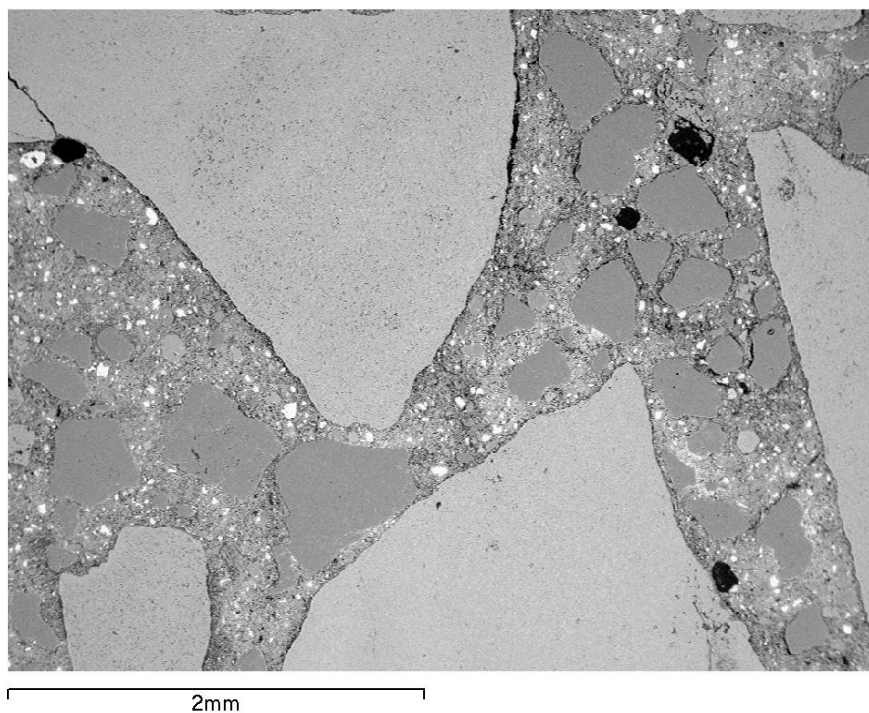


Figura 4.114. Amostra do betão com 20% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 2 mm).

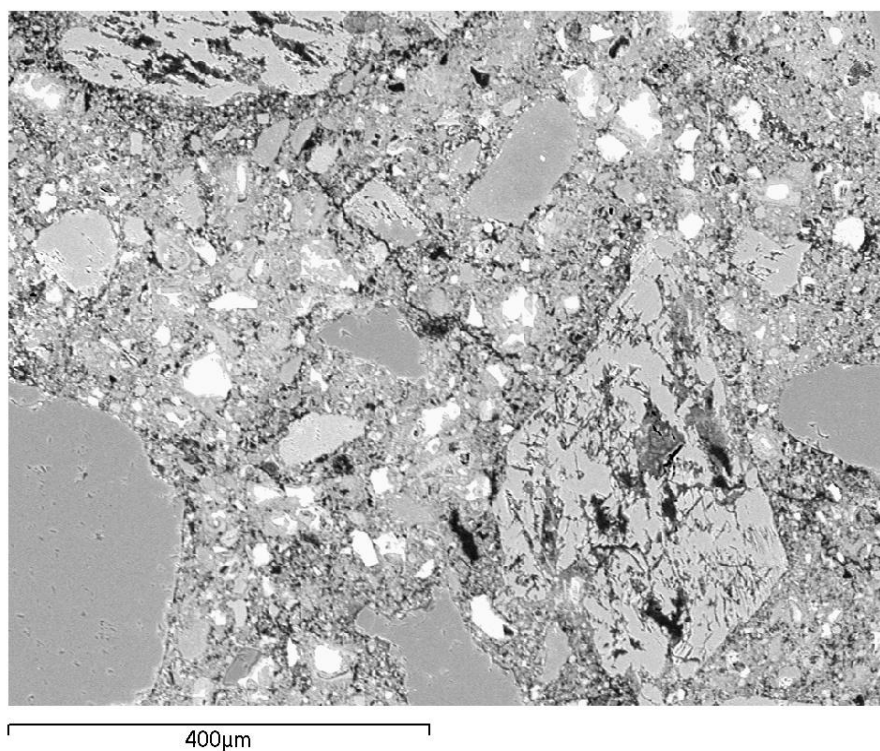


Figura 4.115. Amostra do betão com 20% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 400 µm).

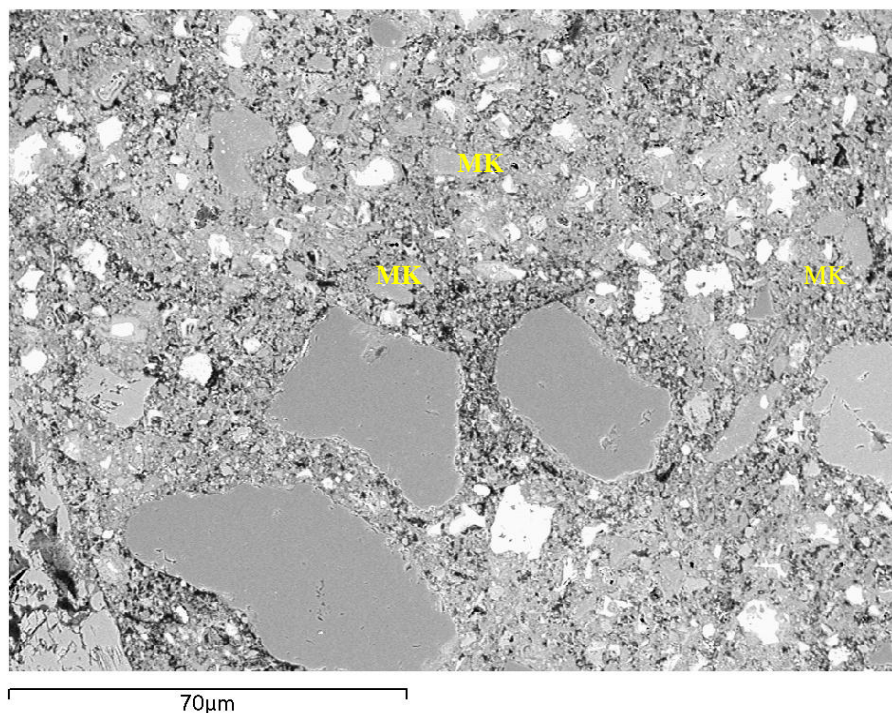


Figura 4.116. Amostra do betão com 20% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 70 µm)

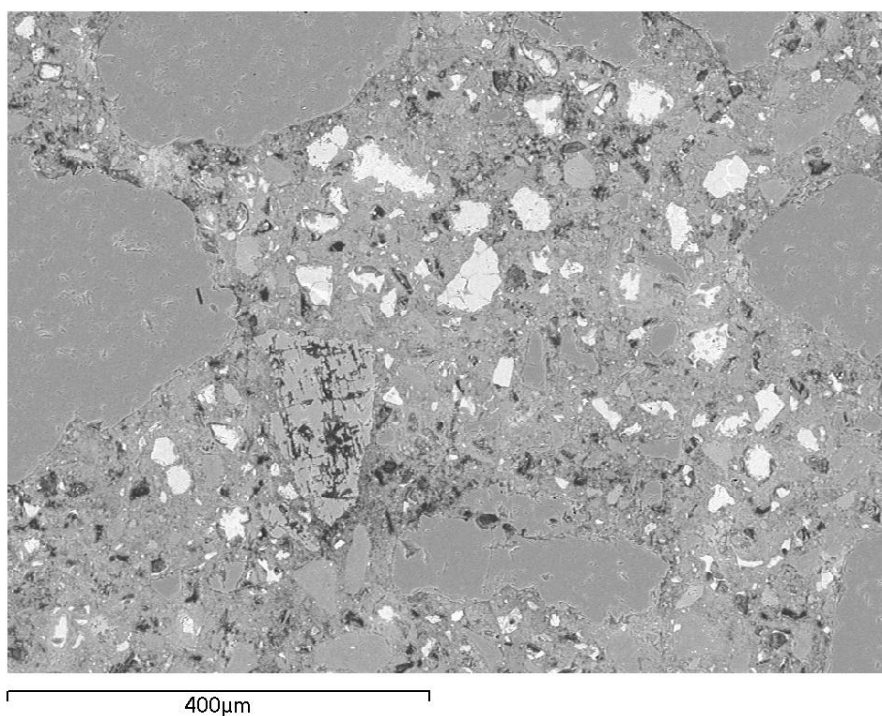


Figura 4.117. Amostra do betão com 30% de MK e com SP, observada por MEV (barra: 400 µm).

A Figura 4.117 prova que betão com 30% de metacaulino e superplastificante consegue uma boa ligação na interface matriz agregado e embora, o aumento do teor em

metacaulino introduza uma maior quantidade de ar no sistema, consegue-se um material com densidade elevada.

4.2.2.2.2. Introdução de diatomite

Uma das razões para a diatomite apresentar menor reatividade pozolânica que o metacaulino tem a ver com a diferença de área superficial, determinada por BET. Enquanto a área superficial do metacaulino é da ordem dos 16 m²/g, a área superficial da diatomite é de 8 m²/g, tornando-a menos reativa. Tsai [Tsai et al 2006] mostrou que uma diatomite com uma área superficial de 4 m²/g (BET) pode aumentar a sua área para cerca de 10m²/g através de um processo de ataque químico com ácido fluorídrico. Este estudo utilizou a diatomite tal como foi enviada pelo fornecedor não se efetuando qualquer processo para melhorar a sua área superficial.

Foi comprovado através do ensaio de Coulter, que a diatomite desaglomera facilmente, no entanto, a presença do agente redutor de água de amassadura tem um efeito benéfico sobre a reação pozolânica da diatomite, tal como se pode observar na Tabela 4.29 onde se pode analisar o consumo da portlandite. Provavelmente este incremento das reações pozolânicas da diatomite deve-se ao facto do superplastificante destruir os aglomerados de cimento, tornando-o mais reativo, acelerando as reações de hidratação e, desta forma aumentar o teor em hidróxido de cálcio disponível para as reações com a diatomite. Além deste fator, a presença do superplastificante, ao destruir aglomerados, promove um aumento da homogeneidade das misturas.

Comparativamente com as formulações cuja trabalhabilidade foi ajustada com água, nas composições com superplastificante o consumo de portlandite pela diatomite é visivelmente superior (Tabela 4.23).

O aumento das reações pozolânicas da diatomite tem consequências sobre a resistência à compressão (Figura 4.118) dos betões. Aos 7 dias, as formulações com 3, 5 e 8% de diatomite ainda apresentam menor resistência que a formulação padrão mas, a composição com 10% de diatomite mostra uma subida ligeiramente acima do padrão. A baixa resistência para as composições com menores quantidades deve-se á baixa reatividade pozolânica da diatomite.

Tabela 4.29: Teor de Ca(OH)_2 , para betões com D e SP, calculado a partir de análises térmicas.

Formulação	Tempo de cura (dias)	Teor em Ca(OH)_2 (% peso de cimento)
B_0.6W	28	15.1
B_5D_0,6W_0,08SP	28	12,4
B_8D_0,6W_0,10SP	28	7,4
B_10D_0,6W_0,12SP	28	5.4

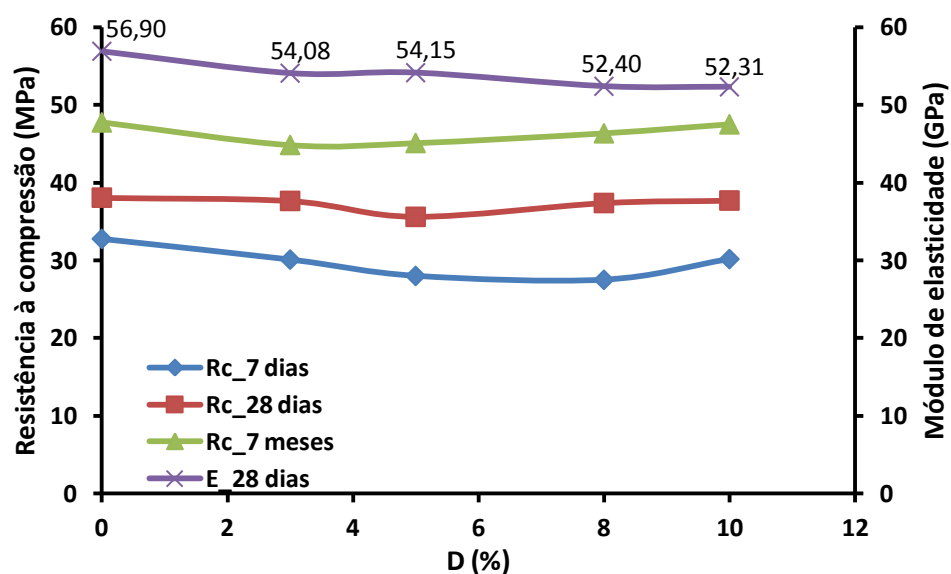


Figura 4.118. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de D e SP em tempo de cura diversos.

Aos 28 dias, já se verifica um ligeiro aumento da resistência com o aumento do teor em diatomite, conseguindo-se valores ligeiramente superiores ao padrão, o mesmo acontecendo para os valores de resistência apresentados aos 7 meses. De uma forma geral, pelo menos até aos 7 meses, embora a diatomite não aumente substancialmente os valores da resistência à compressão dos betões, também não prejudica a resistência, sendo possível diminuir o teor em cimento.

Em relação aos resultados do ensaio de porosimetria patentes na Tabela 4.30 e na Figura 4.119 (28 dias) verifica-se um aumento substancial da porosidade total e do diâmetro médio de poros com a introdução de diatomite mas, estas características vão diminuindo com o aumento da quantidade de diatomite devido às reações hidratação e pozolânicas que ocorrem no interior dos poros capilares.

A Figura 4.119 mostra de uma forma evidente que, com o aumento do teor em diatomite, as curvas de distribuição de diâmetro de poros se aproximam da curva do betão padrão.

A análise da microestrutura de betões com diatomite e acerto de trabalhabilidade com agente redutor de água de amassadura está patente nas Figuras 4.120 a 4.123. O betão com 8% de diatomite e superplastificante observado na Figura 4.120, com baixa ampliação, mostra poucos poros e aparentemente, uma zona de interface entre a matriz e os agregados com uma ligação aceitável. Aumentando a ampliação, para a mesma composição de betão (Figura 4.121), comparando com as amostras com água, confirma-se uma matriz cimentícia muito mais densa e com melhor ligação aos agregados.

Tabela 4.30. Resultados obtidos de porosimetria (porosidade total e diâmetro médio de poro) aos 28 dias para betões com introdução de D e SP.

Composições	Diâmetro médio de poro aos 28 dias (μm)	Porosidade 28 dias (%)
B_0,6W	0,04	8,55
B_5D_0,6W_0,08SP	0,10	21,57
B_8D_0,6W_0,10SP	0,07	17,31

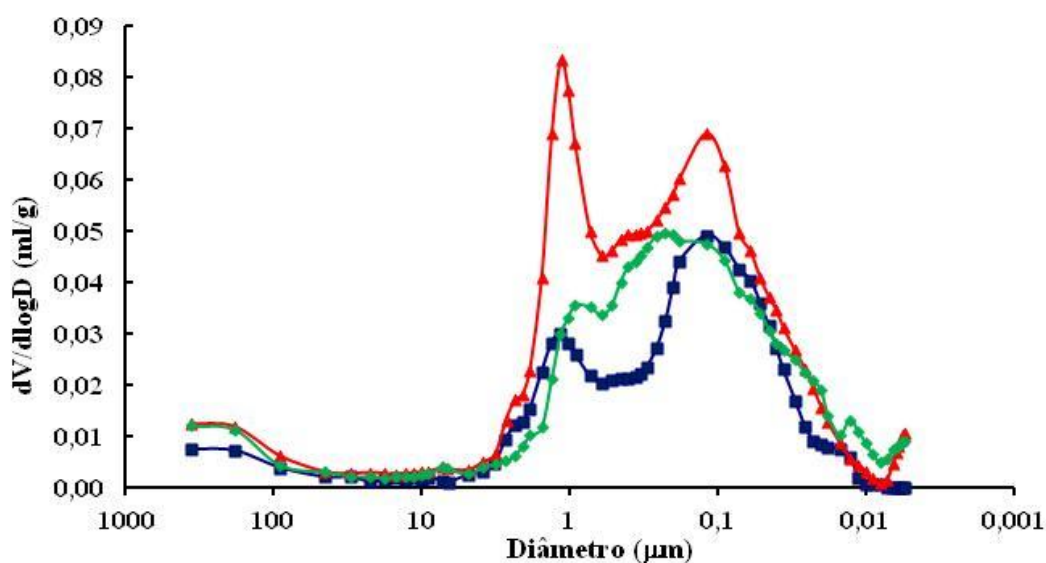


Figura 4.119. Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas de betões com D e SP, aos 28 dias de cura (azul: Padrão; vermelha: 5% D; verde: 8% D).

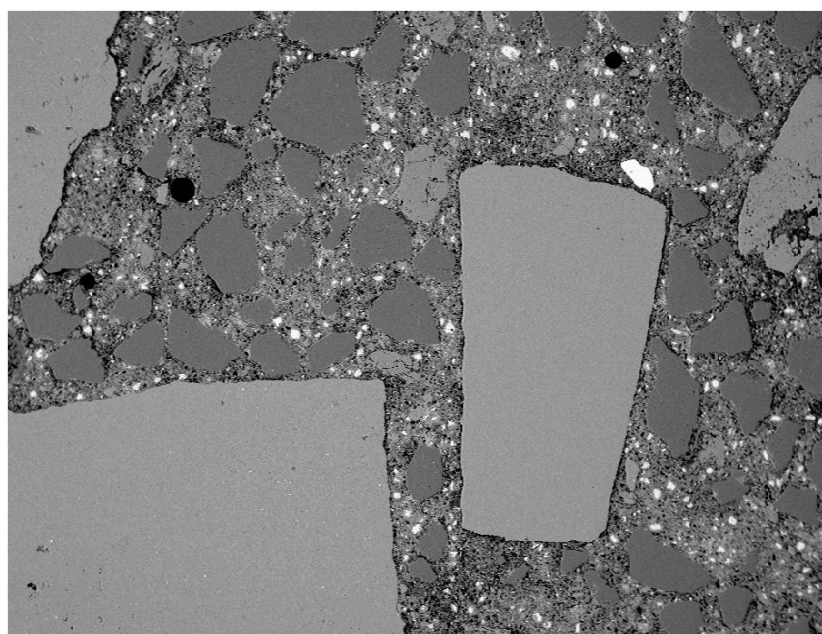


Figura 4.120. Amostra do betão com 8% de D e com SP, observada por MEV (barra: 2 mm).

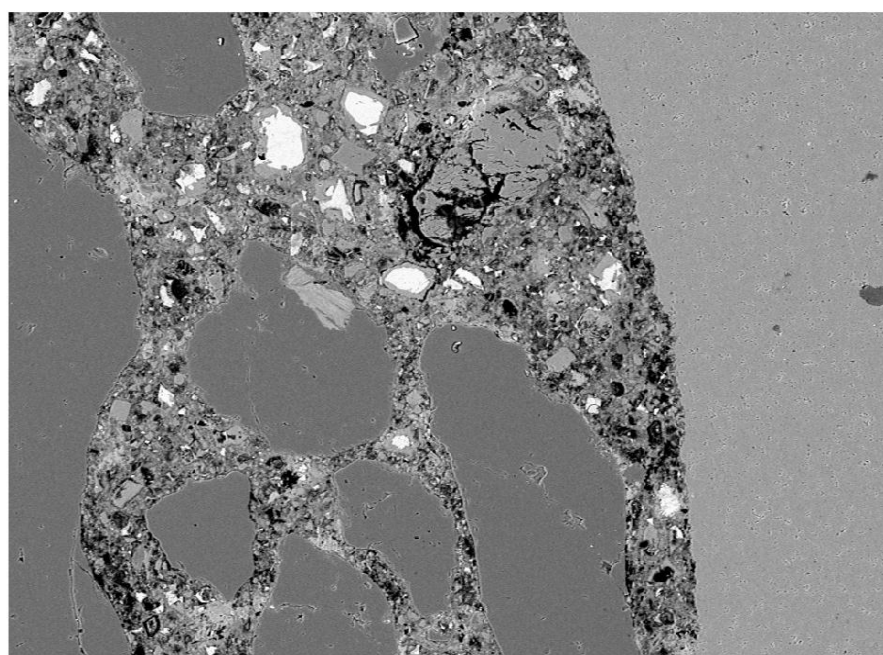


Figura 4.121. Amostra do betão com 8% de D e com SP, observada por MEV (barra: 400 µm).

A Figura 4.123 apresenta uma amostra de betão com 5% de diatomite e superplastificante. Observa-se que com a diminuição do teor em diatomite diminui a

densidade do sistema. Este facto confirma o observado nos resultados obtidos no ensaio de resistência mecânica e nos resultados do ensaio de porosimetria.

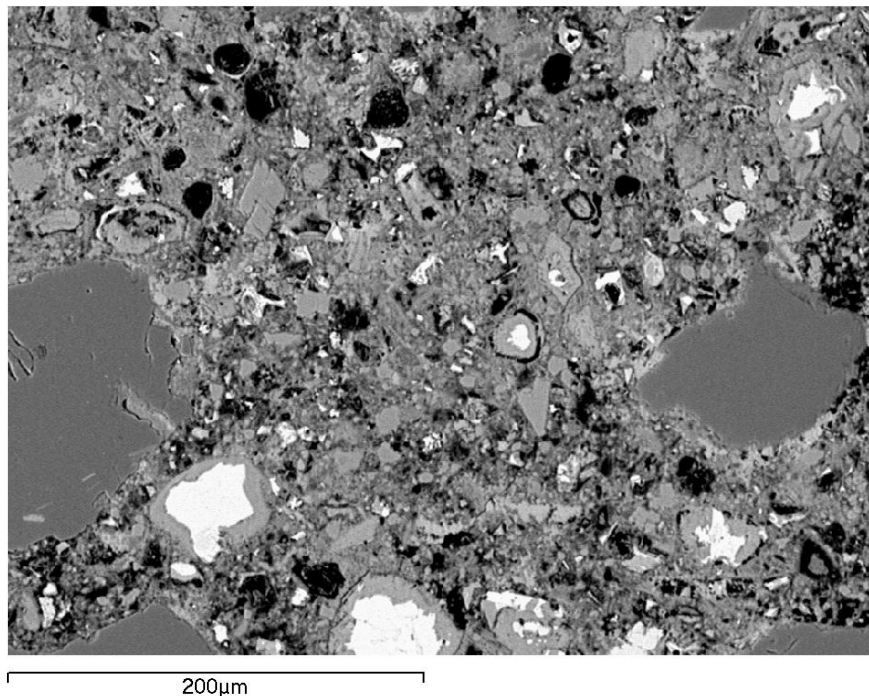


Figura 4.122. Amostra do betão com 8% de D e com SP, observada por MEV (barra: 200 μm).

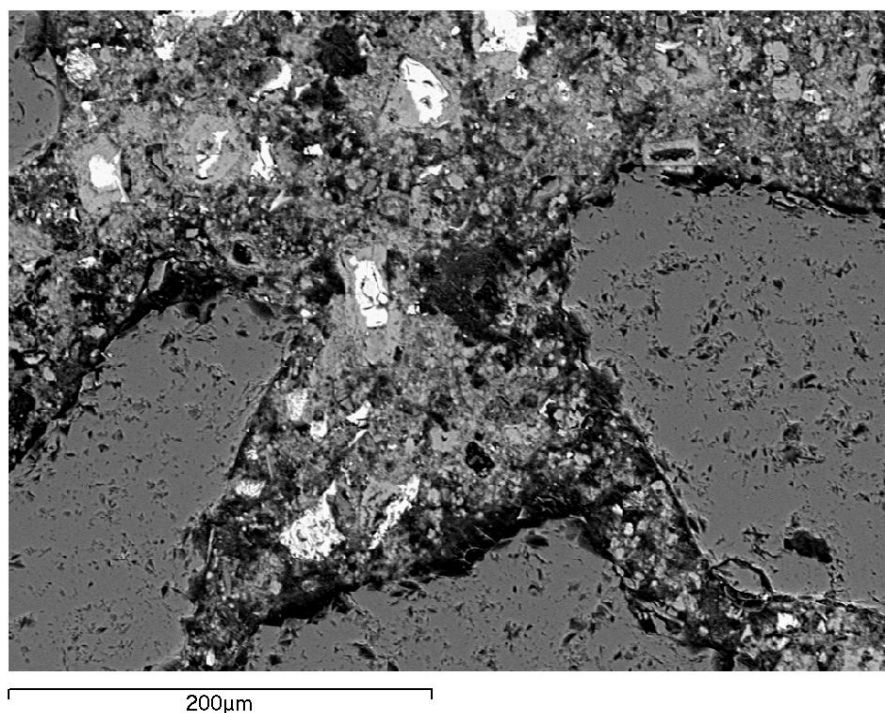


Figura 4.123. Amostra do betão com 5% de D e com SP, observada por MEV.

4.2.2.2.3. Introdução conjunta de metacaulino e diatomite

As formulações mistas de metacaulino e diatomite mostram também que o consumo de portlandite, aos 28 dias, é efetuado principalmente pelo metacaulino (Tabela 4.31). Verifica-se uma diminuição drástica quando a quantidade de metacaulino passa de 5% para 20%, mantendo a diatomite um valor fixo de 3%.

Tabela 4.31. Quantidade de Ca(OH)_2 calculado a partir de análises térmicas nas formulações mistas.

Composição	Tempo de cura (dias)	Teor de Ca(OH)_2 (% peso de cimento)
B_0.6W	28	15,0
B_5MK_3D_0,6W_0,10SP	28	13,7
B_20MK_3D_0,6W_0,16SP	28	1,9

A maior reatividade pozolânica do metacaulino relativamente à diatomite obviamente produz efeitos sobre a resistência à compressão e sobre o módulo de elasticidade das diferentes composições, tal como se pode observar na Figura 4.124. A dispersão das pozolanas e do cimento pelo agente redutor de água de amassadura promove misturas mais homogêneas e reativas, consequentemente a resistência aumenta com o aumento do teor em pozolanas, especialmente do metacaulino. Aos 7 meses a composição com 20% de metacaulino e 3% de diatomite mostra valores de resistência de 49 MPa, da mesma ordem do valor apresentado pela composição apenas com metacaulino. Relativamente ao módulo de elasticidade (a 28 dias) é interessante analisar o seu comportamento, que se encontra em linha com a resistência. Observa-se uma diminuição até cerca de 10% de metacaulino e, para teores superiores desta pozolana verifica-se um aumento.

O comportamento do módulo de elasticidade pode ser justificado pelos resultados de porosimetria de intrusão de mercúrio, patentes na Tabela 4.32, onde se verifica uma diminuição do diâmetro médio de poro e da porosidade total com o aumento do teor em metacaulino. O aumento da quantidade de metacaulino incrementa a reação com a portlandite e, consequentemente, ocorre uma densificação dessas formulações.

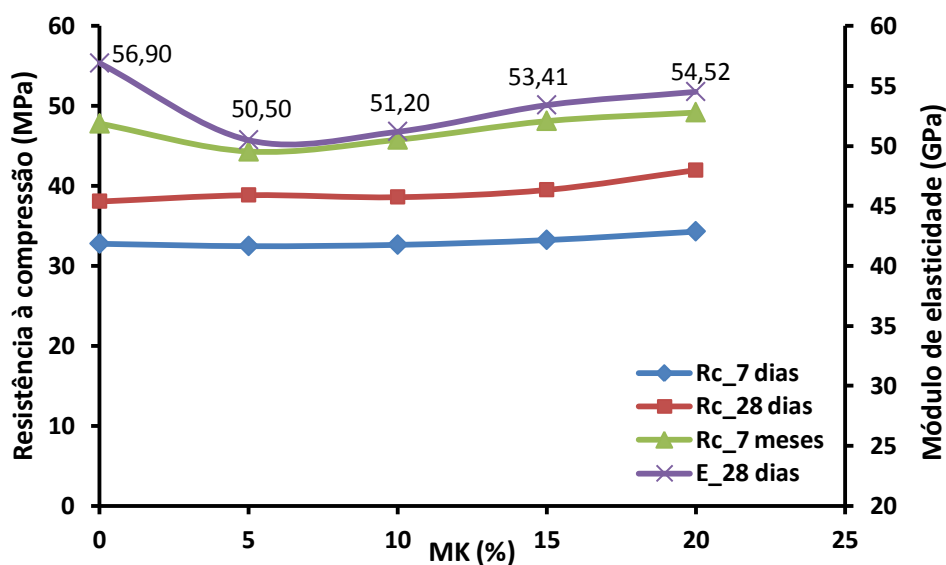


Figura 4.124. Valores de resistência à compressão e do módulo de elasticidade para composições com diferentes teores de MK e SP, com 3% D, em tempo de cura diversos.

A Figura 4.125 mostra de uma forma evidente a diminuição da porosidade total na amostra com 20% de metacaulino e 3% de diatomite bem como o deslocamento da curva de distribuição de tamanho de poros para a zona de tamanhos menores.

Tabela 4.32. Porosidade total e diâmetro médio de poro, aos 7 e 28 dias os betões com introdução de metacaulino e 3% de diatomite (porosimetria de mercúrio).

Composições	Diâmetro médio de poro aos 28 dias (µm)	Porosidade 28 dias (%)
B_0,6W	0,04	8,55
B_5MK_3D_0,6W_0,10SP	0,06	19,79
B_20MK_3D_0,6W_0,15SP	0,04	17,49

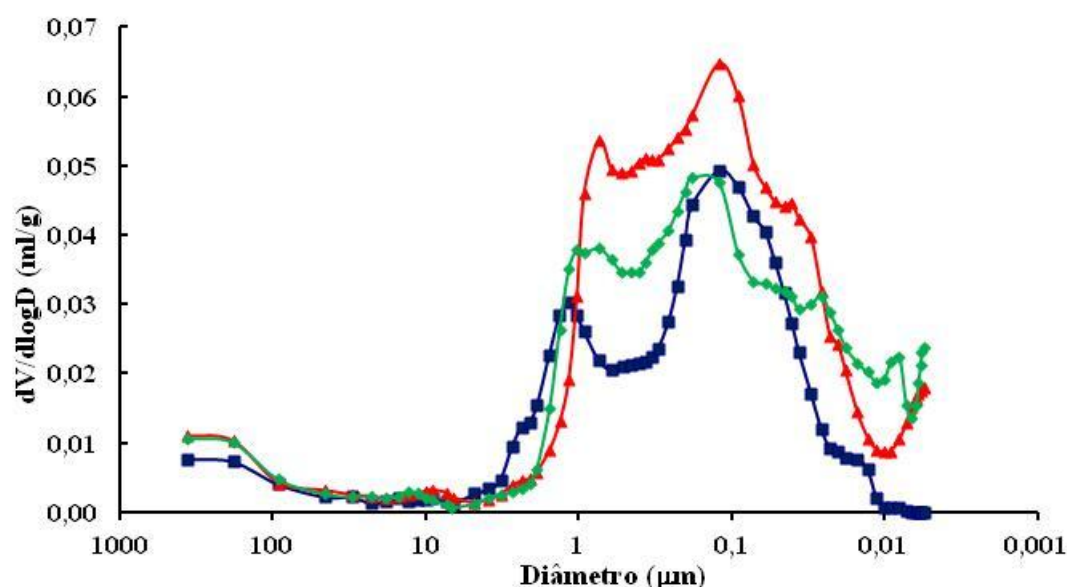


Figura 4.125 . Distribuição de tamanho de poros na argamassa do betão padrão e nas argamassas de betões com MK variável, 3% D e SP (azul: Padrão; vermelha: 5% MK; verde: 20% MK).

Relativamente à microestrutura do betão misto, com metacaulino e diatomite (3% de D), a Figura 4.126 mostra uma amostra de betão com 20% de metacaulino e 3% de diatomite. É possível observar alguns poros, que em princípio provêm do metacaulino mas, a matriz aparenta estar densa e com uma boa ligação aos agregados. Uma maior ampliação (Figura 4.127) contraria a primeira impressão pois, a matriz cimentícia apresenta uma quantidade de poros relativamente elevada. Este facto é confirmado pela Figura 4.128, ainda com maior ampliação, onde se pode observar que a quantidade de microporos é considerável. No entanto, quer neste betão misto quer nos betões com metacaulino ou diatomite, verifica-se que a introdução do agente redutor de água de amassadura melhora o comportamento em endurecido dos betões, diminuindo a porosidade dos betões e consequentemente aumentando a resistência à compressão. Este efeito é tanto maior quanto maior o teor de pozolana introduzida.

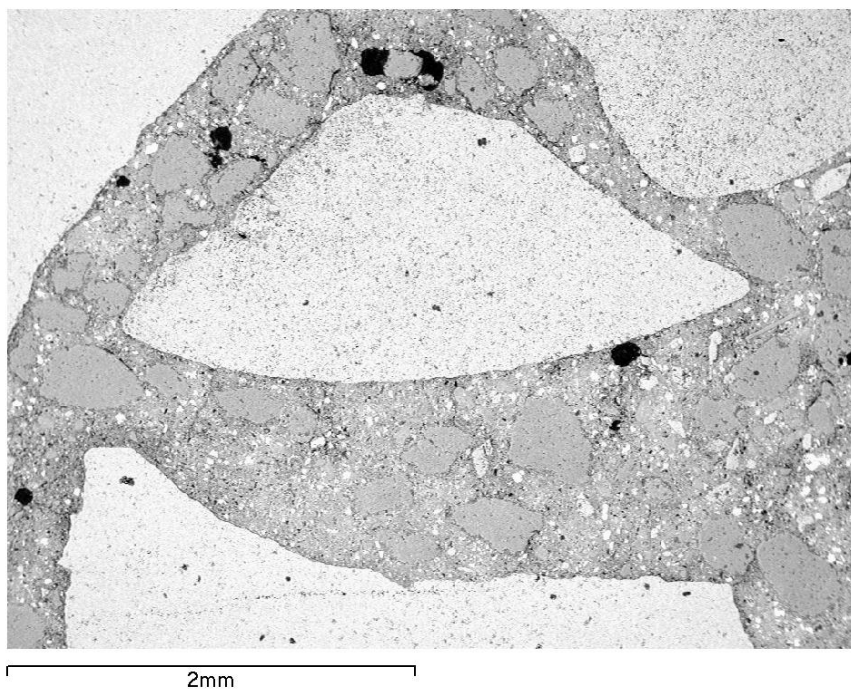


Figura 4.126. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D, com SP, observada por MEV (barra: 2 mm).

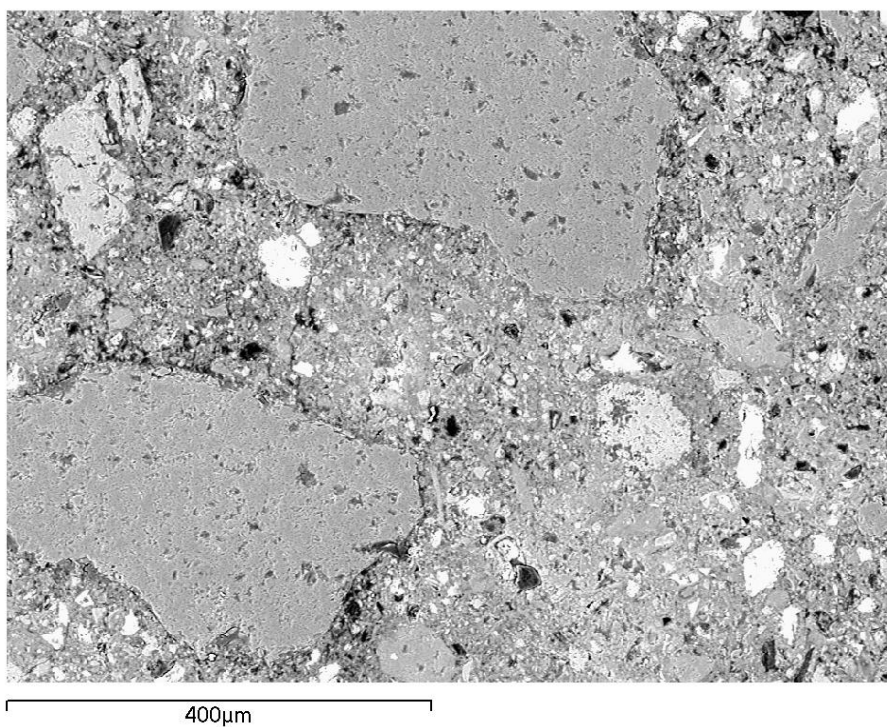


Figura 4.127. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D, com SP, observada por MEV (barra: 400 µm).

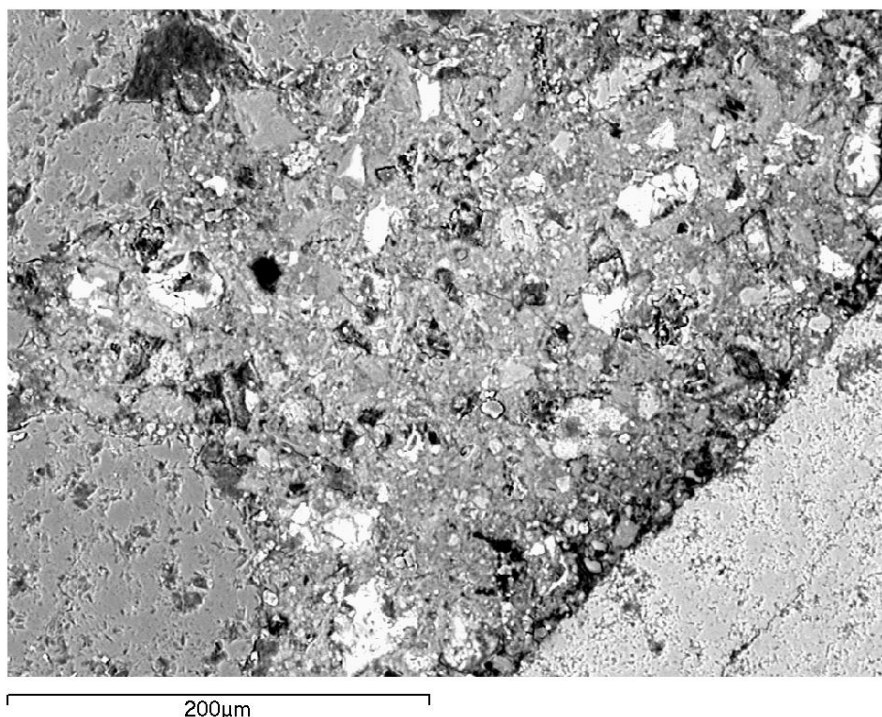


Figura 4.128. Amostra do betão com 20% de MK e 3% de D, com SP, observada por MEV (barra: 200 μm).

4.2.2.2.4 Síntese da análise do efeito de materiais pozolânicos sobre algumas propriedades no estado endurecido de betões.

Em síntese, em relação ao efeito de materiais pozolânicos, especificamente o metacaulino e a diatomite, sobre algumas propriedades no estado endurecido de betões, é possível afirmar que esse efeito depende do material que se usa para o ajuste de trabalhabilidade do betão, dado que a introdução das pozolanas retira trabalhabilidade às misturas. A utilização de água para o ajuste de trabalhabilidade traduz-se sempre numa diminuição da resistência mecânica à compressão com o aumento do teor em pozolana. Este efeito, no metacaulino deve-se principalmente a um aumento da porosidade que é formada pelo ar incluso nos aglomerados de metacaulino. Relativamente à diatomite deve-se a uma falta de coesão quer na matriz cimentícia, quer na interface matriz agregados. Estes comportamentos são evidenciados e comprovados pelos ensaios de porosimetria e pela observação da microestrutura das amostras diferentes de betão.

A utilização de um agente redutor de água de amassadura para o ajuste de trabalhabilidade, devido à sua ação de separação das partículas, tornando-as mais reativas,

confere ao betão um aumento da resistência à compressão com o aumento da quantidade de pozolana introduzida, com consequente diminuição da porosidade. A diminuição da porosidade pode ser observada quer pelos resultados da porosimetria quer através da análise da microestrutura das diferentes amostras de betão. No entanto, como pode ser verificado pelos valores da resistência à compressão, a melhoria das propriedades em endurecido dos betões é mais evidente nas formulações com metacaulino que nas composições com diatomite. Este facto deve-se à elevada reatividade pozolânica do metacaulino em contraste com a baixa reatividade pozolânica da diatomite, devido á sua menor velocidade de reação. Este facto é confirmado pelos resultados das análises térmicas, onde a diminuição do teor em portlandite é significativamente maior nos betões com metacaulino.

4.2.3. Efeito de materiais pozolânicos sobre a durabilidade de betões.

A penetração dos iões cloreto no betão armado e consequente corrosão do aço é um dos problemas na indústria de construção. As estruturas de betão armado são muitas vezes expostas a ambientes agressivos. No entanto, espera-se que estas estruturas durem, com pouca ou nenhuma manutenção, longos períodos de tempo. Para tal é necessária a produção de estruturas de betão muito resistentes. Especificamente no caso das pontes de betão armado a principal forma de ataque ambiental é a penetração de iões cloretos, o que conduz à corrosão do aço de reforço, com consequente redução da resistência e estética, podendo levar a uma reparação precoce ou substituição prematura da estrutura. Uma forma de impedir esta deterioração é evitando a penetração dos cloretos na estrutura usando betões mais impermeáveis.

Atualmente é amplamente aceite a utilização de materiais pozolânicos, em substituição parcial do cimento Portland, na produção de argamassas e principalmente de betões. Para além da componente ambiental, a utilização de pozolanas apresenta imensas vantagens, nomeadamente no que se refere à durabilidade do betão (Glasser, Marchand et al. 2008).

No betão, iões cloreto podem ficar livres, em solução, dentro dos poros ou ligar-se fisicamente aos produtos da hidratação do cimento. A capacidade dos produtos cimentíceos para ligar os iões cloreto reduz a taxa de transporte dos iões cloreto para o interior do

betão. A taxa de redução depende da capacidade de ligação dos produtos das reações de hidratação e pozolânica. A substituição parcial de cimento por pozolanas, especificamente cinzas e metacaulino, implica a formação adicional de produtos hidratados aumentando a capacidade de ligação relativamente ao betão apenas com cimento. Desta forma, a concentração total de cloretos (livres ou ligados) nas camadas exteriores do betão com pozolanas pode ser igual ou superior á concentração no betão apenas com cimento [Bai et al 2003, Martin-Perez et al 2005]. Simultaneamente, devido á formação de produtos da reação pozolânica no interior dos espaços capilares, para além do aumento da capacidade de ligação da matriz cimentícia, o sistema de poros torna-se também mais fino e segmentado, dificultando a difusão dos cloretos [Bai et al 2003, Martin-Perez et al 2005].

Neste estudo, é avaliado o efeito da introdução de metacaulino e diatomite sobre a resistência do betão à penetração de cloretos, usando para tal dois métodos (quantitativo e qualitativo) para determinação do teor em cloretos nos betões, em amostras imersas numa solução salina artificial.

4.2.3.1. Determinação do teor em cloretos efetuada por potenciometria, de acordo com a norma EN 1015-17:2000 .

Este método quantitativo utilizou amostras cúbicas as quais, antes da imersão, foram impermeabilizadas com uma resina em quatro das faces, ficando duas faces opostas expostas à solução salina. Após os seis meses de imersão as amostras foram cortadas em três fatias até ao centro do provete. Cada fatia é sujeita a moagem e tratada quimicamente para se efetuar a análise.

4.2.3.1.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre a resistência à penetração de cloretos em betões com pozolanas.

A Tabela 4.33 mostra os resultados do teor em cloretos, determinado para alguns betões com metacaulino, com diatomite e metacaulino com diatomite, comparativamente com o betão padrão. Cada composição mostra a quantidade de cloretos calculada para o exterior (face em contacto com a solução salina), a zona intermédia e o centro da amostra,

sendo possível traçar um perfil de penetração dos cloretos do exterior para o interior do betão. A trabalhabilidade de cada betão foi ajustada com água.

Analisando a Tabela 4.31, verifica-se que os betões cuja composição contêm apenas metacaulino são aqueles que apresentam uma melhor resistência à penetração de cloretos. Tal como Bai e Martin-Perez [Bai et al 2003; Martin-Perez et al 2005] afirmavam, a concentração total de cloretos na face exterior dos betões com metacaulino (10% e % de MK) é superior á apresentada pelo betão padrão. No entanto, nas zonas do meio e no interior, os valores de concentração de cloretos nos betões com metacaulino são inferiores ás do betão padrão. Esta diminuição é tanto maior quanto maior a quantidade de metacaulino. Este efeito resulta da elevada reatividade pozolânica do metacaulino que consegue, desta forma, ligar-se a uma grande quantidade de iões cloreto. A extensão da reação pozolânica promove também uma densificação do sistema impedindo a penetração dos iões.

Tabela 4.33. Teor de Cl^- determinado para diferentes composições estudadas e com ajuste de trabalhabilidade com água.

Composição do betão	Zona da amostra	Cl^- (mg/kg)
Padrão B_0,6W	Exterior	2452
	Meio	1197
	Interior	673
B_10MK_0,65W	Exterior	2887
	Meio	620
	Interior	339
B_20MK_0,75W	Exterior	2661
	Meio	424
	Interior	182
B_5D_0,67W	Exterior	3221
	Meio	772
	Interior	242
B_8D_0,70W	Exterior	3423
	Meio	1335
	Interior	736
B_5MK_3D_0,67W	Exterior	4553
	Meio	1351
	Interior	452
B_20MK_3D_0,75W	Exterior	2804
	Meio	470
	Interior	301

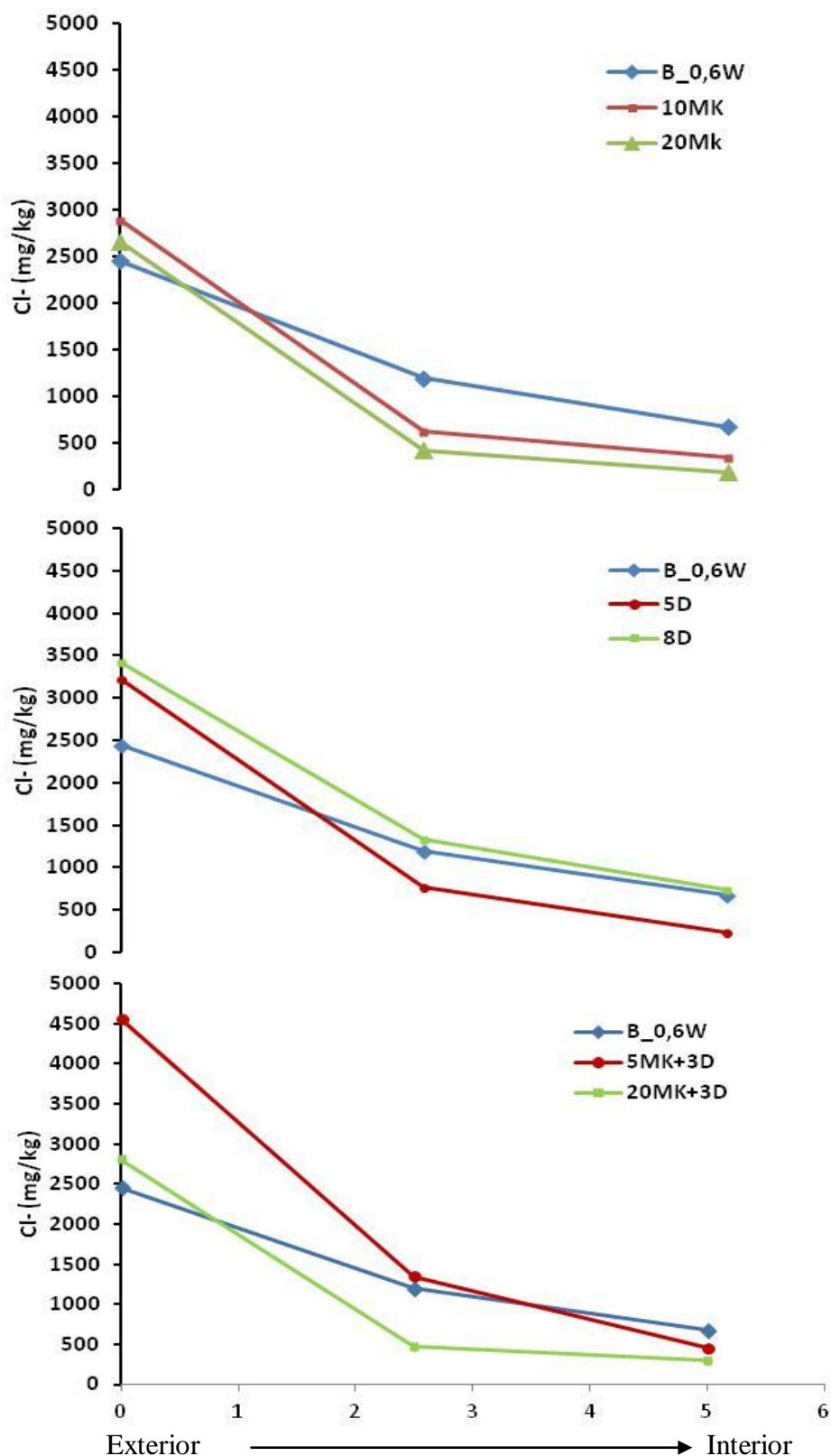


Figura 4.129. Valor de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas (metacaulino com 3% de diatomite) desde o exterior até ao interior das amostras.

Relativamente aos betões com diatomite e ajuste de trabalhabilidade com água, apenas a composição com 5% de diatomite mostra valores, no meio e no interior da amostra, inferiores aos do betão padrão. A composição com 8% de diatomite, devido à porosidade da matriz cimentícia e à sua baixa reatividade pozolânica apresenta valores de concentração de cloretos superiores aos do betão padrão.

As composições mistas, com 5 e 20% metacaulino e 3% diatomite, confirmam que a diminuição da taxa de difusão dos iões cloreto é obtida pelo aumento do teor em metacaulino, ou seja, pelo aumento de produtos de reação com capacidade para ligar os iões cloreto impedindo-os de difundir para o interior do sistema.

A Figura 4.129, mostra de uma forma mais explícita a evolução da penetração dos iões cloreto nas amostras ensaiadas. As formulações com metacaulino, quando comparadas com o betão padrão, apresentam na zona exterior das amostras uma concentração mais elevada de iões cloreto mas rapidamente mostram uma descida da concentração devido à menor penetração dos mesmos.

Embora se observe uma redução da concentração dos cloretos quando se passa da composição com 10% de metacaulino para 20% de metacaulino, a diferença entre o comportamento das duas composições não é substancialmente diferente. Relativamente às composições com diatomite, a extensão da zona exterior com concentração de cloretos superior à apresentada pelo betão padrão é superior à observada nas formulações com metacaulino.

Por outro lado, apenas o betão com 5% de diatomite mostra concentrações de iões cloreto, no centro e interior da amostra, inferiores à do betão padrão. A composição com 8% de diatomite, devido ao aumento da porosidade, mostra um comportamento de penetração de cloretos idêntico ao do betão padrão.

Finalmente, nos betões com metacaulino e diatomite, a amostra com 5% de metacaulino e 3% de diatomite apenas apresenta concentrações de cloretos, inferiores ao betão padrão, a partir do meio da amostra. O aumento do teor em metacaulino para 20% mostra um comportamento bastante idêntico ao observado nas formulações apenas com metacaulino.

4.2.3.1.2. Efeito de um agente redutor de água de amassadura sobre a resistência à penetração de cloretos em betões com pozolanas.

A Tabela 4.34 mostra os resultados dos perfis de concentração de cloretos para algumas das composições com metacaulino e diatomite com o ajuste de trabalhabilidade efetuado através da utilização de um superplastificante. Devido à ação dispersante do agente redutor de água de amassadura, as partículas de pozolana separadas reagem mais rapidamente com a portlandite, aumentando os produtos das reações pozolânicas que vão ligar os iões cloreto e densificando a matriz cimentícia.

Tabela 4.34. Teor de Cl^- determinado para diferentes composições estudadas e com ajuste de trabalhabilidade com SP.

Composição do betão	Zona da amostra	Cl^- (mg/kg)
Padrão B_0,6W	Exterior	2452
	Meio	1197
	Interior	673
B_10MK_0,6W_0,10SP	Exterior	1882
	Meio	543
	Interior	187
B_20MK_0,6W_0,15SP	Exterior	1867
	Meio	290
	Interior	101
B_5D_0,6W_0,08SP	Exterior	2469
	Meio	379
	Interior	193
B_8D_0,6W_0,10SP	Exterior	2544
	Meio	478
	Interior	195
5MK_3D_0,6W_0,10SP	Exterior	3584
	Meio	764
	Interior	340
20MK_3D_0,6W_0,15SP	Exterior	2198
	Meio	246
	Interior	178

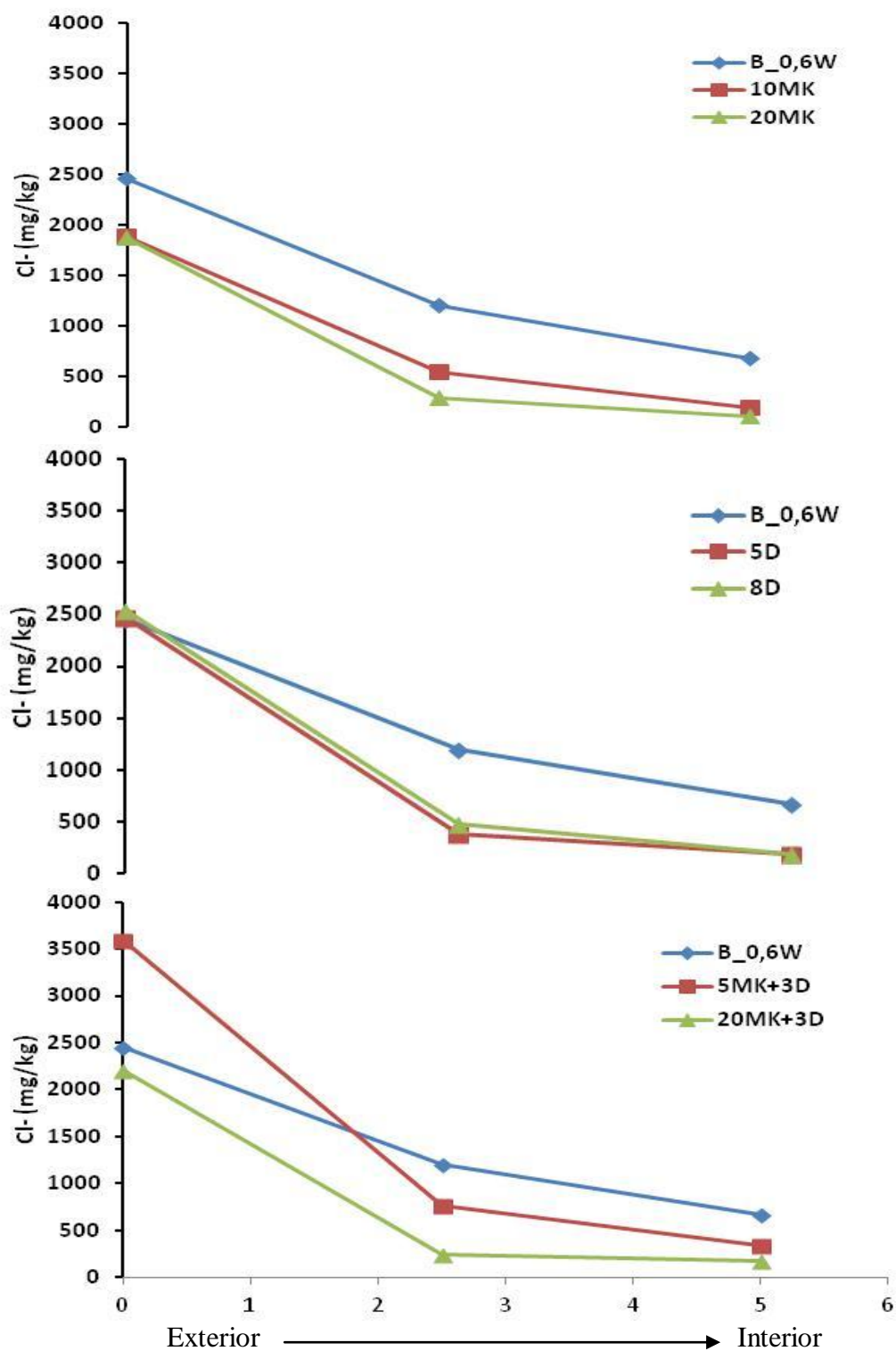


Figura 4.130. Valor de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas (metacaulino com 3% de diatomite) desde o exterior até ao interior das amostras.

A Figura 4.130 mostra de uma forma mais clara o comportamento da penetração dos íons cloretos para os betões com diferentes pozolanas e com trabalhabilidade ajustada com um agente redutor de água de amassadura.

Assim, todas as composições mostram uma diminuição da concentração de cloretos no meio e no interior das amostras de betão relativamente ao betão padrão. A separação das partículas finas promovida pela presença do superplastificante, aumenta a reatividade do sistema, acelerando as reações de hidratação e pozolânicas que fornecem ao sistema quantidades elevadas de produtos de reação com capacidade para ligar os íons cloretos. Esta diminuição é superior nas composições com metacaulino confirmando a sua maior reatividade pozolânica.

As composições com 10 e 20% de metacaulino apresentam, logo na zona exterior uma concentração de cloretos inferior à apresentada pelo betão padrão, mantendo esse comportamento até ao interior das amostras.

As composições com superplastificante, com os materiais finos mais desaglomerados, são mais reativas e desta forma promovem a densificação dos betões, dificultando a difusão dos íons cloreto. Os betões com diatomite embora mostrem uma concentração de íons cloreto, mesmo à superfície das amostras, igual à apresentada pelo betão padrão, rapidamente se observa uma descida acentuada da concentração de cloretos até ao interior das amostras.

Em relação às composições com metacaulino e diatomite, o betão com 5% de metacaulino apresenta junto ao exterior das amostras uma concentração bastante elevada de cloretos e apenas perto do centro da amostra a concentração passa a ser inferior à do betão padrão. O betão com 20% de metacaulino apresenta uma concentração de cloretos sempre inferior à apresentada pelo betão padrão. A ação do aumento do teor em metacaulino, muito reativo, sobrepõe-se ao efeito de aumento de porosidade da diatomite.

4.2.3.2. Observação do perfil de penetração de cloretos em betões com pozolanas através de um método qualitativo.

Neste processo, de carácter qualitativo, foram utilizadas amostras cilíndricas que foram sujeitas a um ensaio de resistência à compressão diametral, que separa o cilindro em duas metades. Uma das metades foi pulverizada com nitrato de prata que, ao reagir com os

cloretos, dá origem a uma cor cinzenta prateada. A intensidade da cor fornece uma indicação da profundidade de penetração dos cloretos, desde o exterior até ao interior da amostra.

4.2.3.2.1. Efeito do teor em água de amassadura sobre o perfil de penetração de cloretos em betões com pozolanas.

A Tabela 4.35 apresenta os resultados para a profundidade de penetração de cloretos em betões com metacaulino e diatomite, cuja trabalhabilidade foi ajustada através da alteração do teor em água de amassadura. Todas as composições oferecem uma maior resistência á penetração de cloretos que a formulação padrão. Apenas foi analisada uma composição com metacaulino (20% de MK) que mostra a menor profundidade de penetração dos iões cloreto. Para as composições com diatomite verifica-se uma diminuição da profundidade de penetração com o aumento do teor em diatomite o que contraria os resultados obtidos através do método efetuado por potenciometria. Relativamente aos betões de composição mista (metacaulino e diatomite), os resultados também mostram uma diminuição da penetração de cloretos com o aumento do teor em metacaulino. Também aqui se pode observar que a maior reatividade pozolânica do metacaulino se traduz numa maior ligação dos iões cloreto e numa maior densificação do sistema.

Tabela 4.35. Profundidade de penetração de cloretos em algumas amostras estudadas. O ajuste de trabalhabilidade foi efetuado com água.

Composições	Profundidade de penetração (mm)	Profundidade de penetração média (mm)
Padrão B_0,60W	30 a 40	35,0
B_20MK_0,70W	10 a 11	10,5
B_3D_0,65W	30 a 46	38,0
B_5D_0,67W	22 a 28	25,0
B_8D_0,70W	15 a 18	16,5
B_10D_0,73W	16 a 18	17,0
B_5MK_3D_0,67W	25 a 28	26,5
B_10MK_3D_0,67W	25 a 50	37,5
B_15MK_3D_0,73W	15 a 18	16,5
B_20MK_3D_0,75W	14 a 17	15,5

A Figura 4.131 apresenta a profundidade de penetração de cloretos para algumas composições estudadas e cujo ajuste de trabalhabilidade foi efetuado através da variação da quantidade de água. A composição com 20% de metacaulino é aquela que mostra menor profundidade de penetração, tal como se pode observar na Figura 4.132, que compara a profundidade de penetração dos cloretos entre o betão padrão e o betão com 20% de metacaulino. É evidente a diminuição da profundidade de penetração de cloretos no betão com metacaulino.

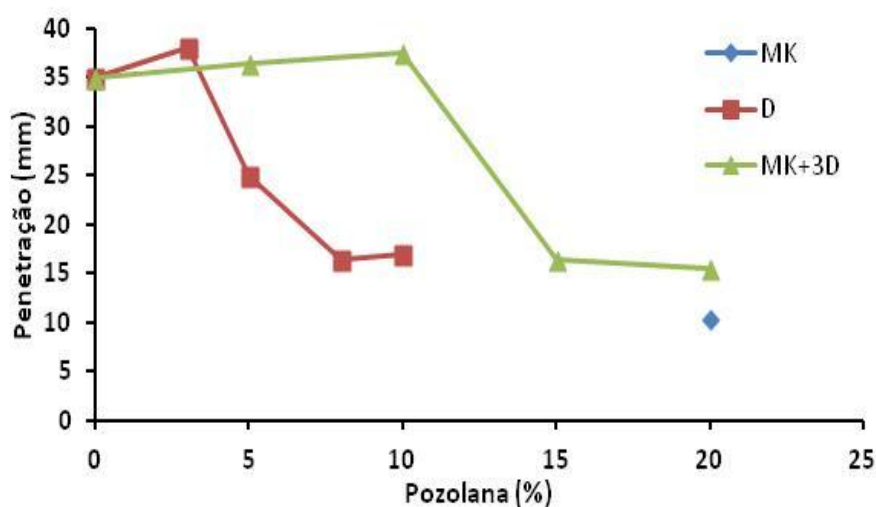


Figura 4.131. Valor de profundidade de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas, com ajuste de trabalhabilidade através do teor de água.



Padrão: B_0,60W



B_20MK_0,70W

Figura 4.132. Amostra Padrão e amostra com metacaulino submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

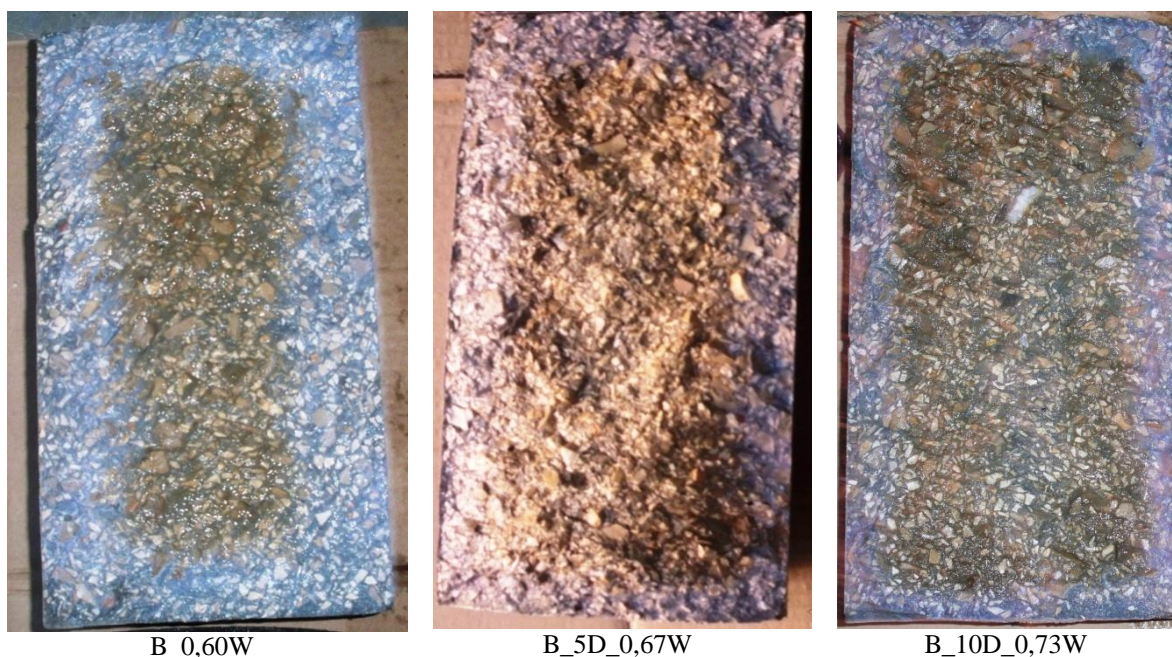


Figura 4.133. Amostra Padrão e amostras com diatomite submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

Nas formulações com diatomite, a tendência também é de diminuição da profundidade de penetração com o aumento do teor em diatomite (Figura 4.131). A Figura 4.133 compara o betão padrão com betões com 5% e 10% de diatomite. Observa-se uma diminuição da profundidade de penetração dos cloretos com a introdução e aumento do teor em diatomite. No entanto, principalmente no betão com 10% de diatomite verifica-se no interior das amostras uma concentração significativa de cloretos devido à porosidade provocada pela presença da diatomite.

Finalmente, em relação às composições com variação do teor em metacaulino e 3% de diatomite (Figura 4.131), apenas a partir dos 10% de metacaulino é possível observar uma diminuição da profundidade de penetração de cloretos. A Figura 4.134 mostra a comparação das formulações com 5 e 20% de metacaulino e, a composição com 5% de metacaulino apresenta uma orla da ordem dos 25 mm, mas também mostra uma difusão dos cloretos para o interior da amostra bastante significativa. O aumento teor em metacaulino para 20% reduz claramente a penetração dos iões cloretos.

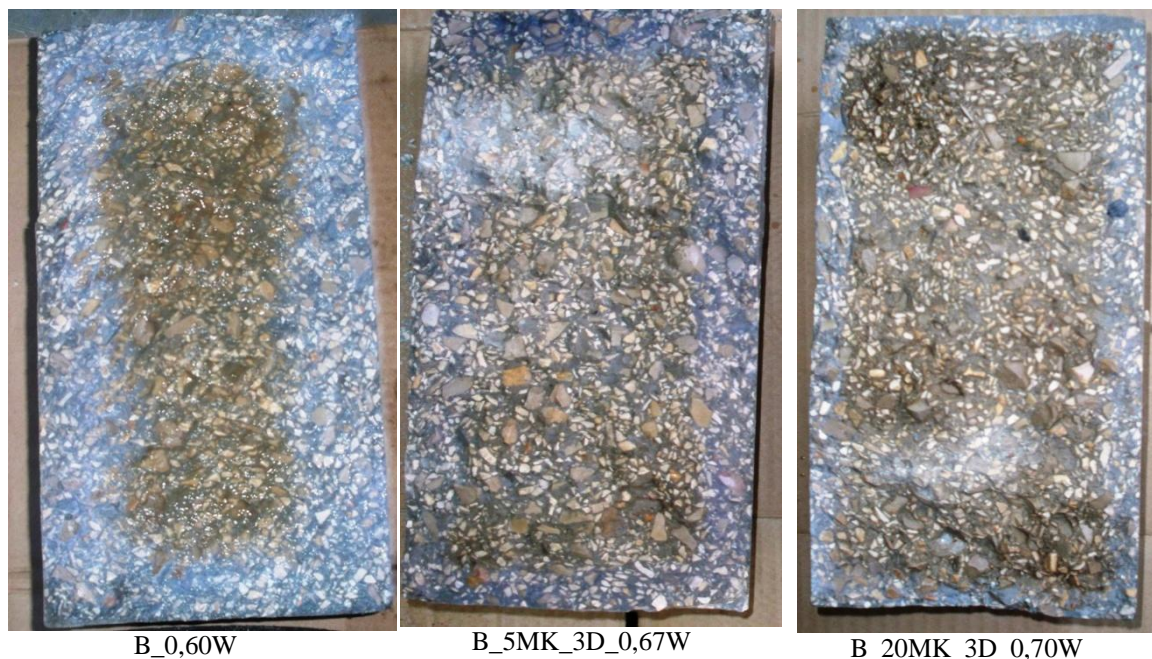


Figura 4.134. Amostra padrão e amostras com metacaulino e diatomite submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

4.2.3.2.2. Efeito de um agente redutor de água de amassadura sobre a resistência à penetração de cloretos em betões com pozolanas.

A utilização de um agente redutor de água de amassadura, tal como se pode observar na Tabela 4.36, aumenta a reatividade dos ligantes aumentando a sua capacidade de ligar o ião cloreto. Desta forma, verifica-se uma diminuição da profundidade de penetração dos cloretos para todas as composições estudadas relativamente à composição padrão.

A Figura 4.135 apresenta a profundidade de penetração de cloretos para algumas composições estudadas e cujo ajuste de trabalhabilidade foi efetuado através da introdução de um agente redutor de água de amassadura. Também neste ensaio o metacaulino é muito eficaz na redução da profundidade de penetração dos iões cloreto, tal como se pode ver na Figura 4.136, onde comparando com o betão padrão se pode verificar que a diminuição da profundidade de penetração é notória e o interior da amostra não mostra presença de cloretos.

Relativamente às composições com diatomite, a tendência também é de uma diminuição da profundidade de penetração dos iões cloreto com o aumento da quantidade

de diatomite introduzida na formulação (Figura 4.135). A Figura 4.137 mostra esse efeito, mas ainda se pode detectar alguma concentração de cloretos no interior da amostra com 5% de diatomite. O betão com 10% de diatomite mostra uma redução da difusão dos cloretos para o interior.

Tabela 4.36. Profundidade de penetração de cloretos em algumas amostras estudadas. O ajuste de trabalhabilidade foi efetuado com SP.

Composições	Profundidade de penetração (mm)	Profundidade de penetração média (mm)
Padrão B_0,60W	30 a 40	35,0
B_20MK_0,60W_0,15SP	7 a 9	8,0
B_3D_0,60W_0,05SP	28 a 35	31,5
B_5D_0,60W_0,10SP	18 a 21	19,5
B_8D_0,60W_0,10SP	15 a 18	16,5
B_10D_0,60W_0,12SP	13 a 15	14,0
B_5MK_3D_0,60W_0,10SP	20 a 23	21,5
B_10MK_3D_0,60W_0,12SP	14 a 18	16,0
B_15MK_3D_0,60W_0,14SP	12 a 15	13,5
B_20MK_3D_0,60W_0,16SP	9 a 13	11,0

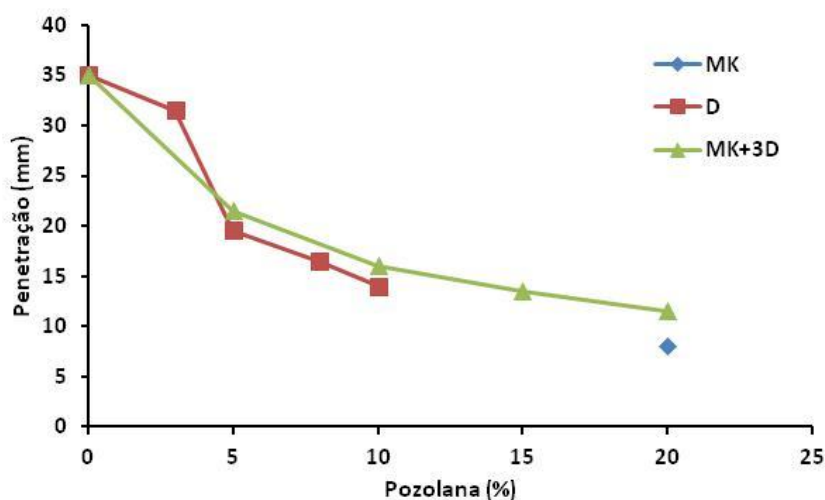


Figura 4.135. Valor de profundidade de penetração de cloretos em amostras com metacaulino, diatomite e mistas, com ajuste de trabalhabilidade através de um agente redutor de água.

As composições com metacaulino e diatomite (Figura 4.135) comprovam que o aumento do teor em metacaulino melhora a resistência à penetração de cloretos. Também a Figura 4.138 mostra a redução da profundidade de penetração dos cloretos com o aumento do teor em metacaulino.

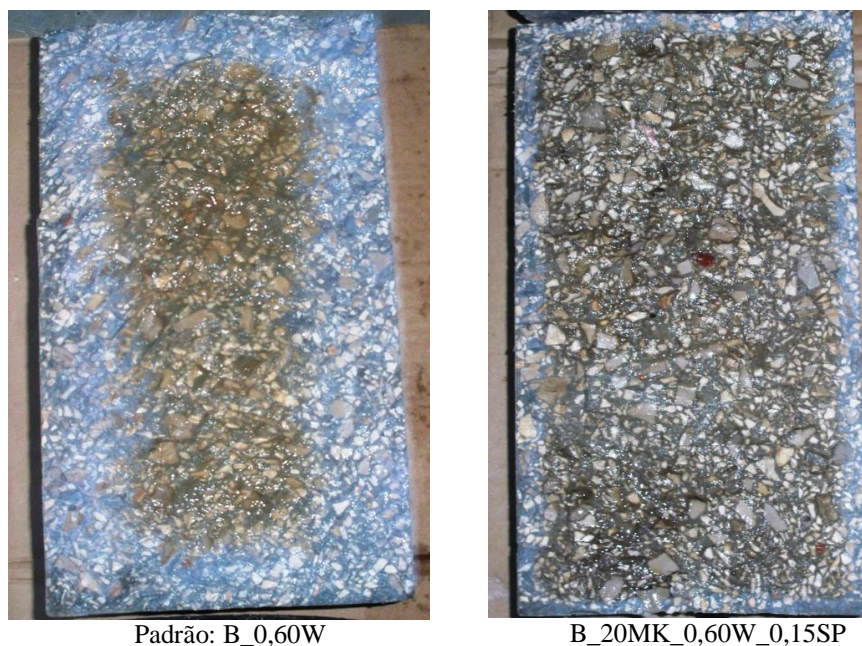


Figura 4.136. Amostra Padrão e amostra com metacaulino e SP submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

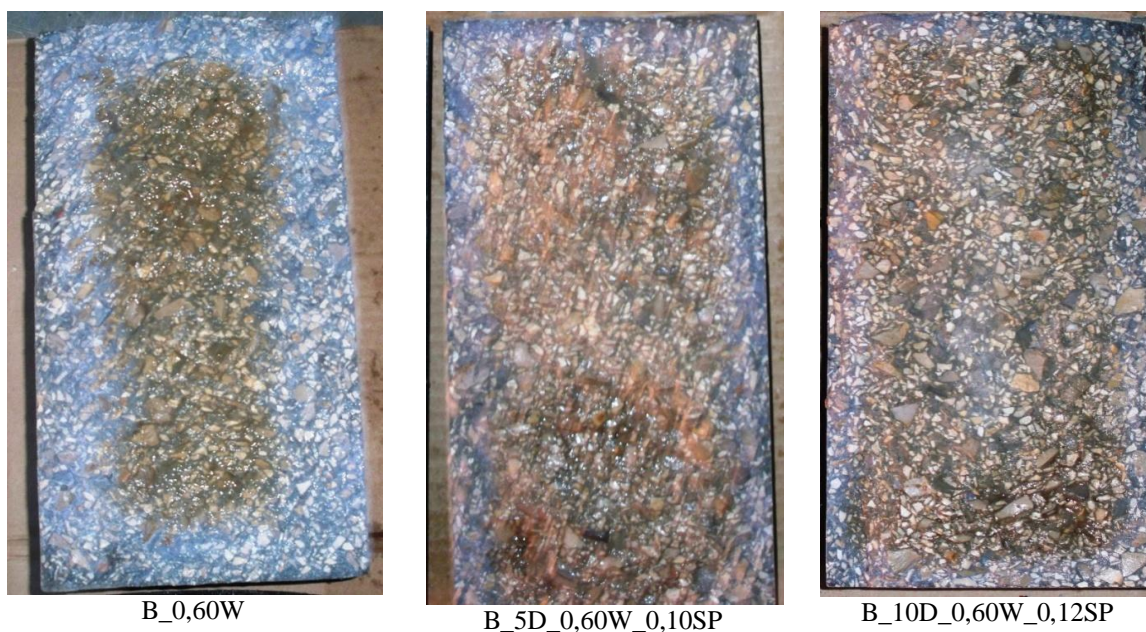


Figura 4.137. Amostra Padrão e amostras com diatomite e SP submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

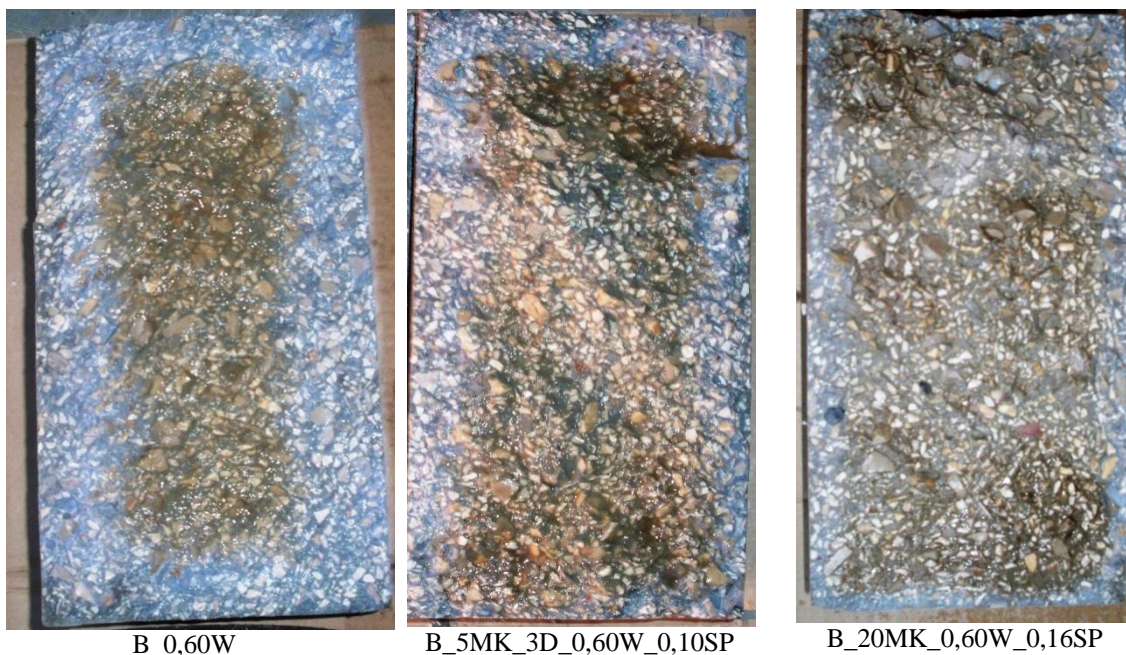


Figura 4.138. Amostra padrão e amostras com metacaulino, diatomite e SP submetidas a ensaio de penetração de cloretos.

Comparativamente com as formulações cuja trabalhabilidade foi ajustada com água, a presença do agente redutor de água de amassadura aumenta a reatividade dos sistemas diminuindo a profundidade de penetração de íons cloreto, para todas as composições.

4.2.3.4. Síntese do efeito do metacaulino e da diatomite sobre a durabilidade de betões.

A elevada reatividade do metacaulino garante uma elevada quantidade de produtos da reação pozolânica, que por um lado aumentam a capacidade de ligação aos íons cloreto e, por outro lado densificam a matriz cimentícia dificultando a difusão dos mesmos. Este efeito pode ser observado nas composições cujo ajuste de trabalhabilidade foi efetuado através de um agente redutor de água de amassadura, mas também, quando o ajuste se fez através da alteração do teor em água de amassadura. No entanto este efeito é mais eficaz quando na composição do betão está presente o superplastificante.

A baixa reatividade pozolânica da diatomite, devido a uma baixa velocidade de reação com a portlandite e a porosidade que a diatomite introduz nas formulações com

ajuste de trabalhabilidade com água, torna esta pozolana com menor capacidade de retenção dos cloretos, sendo esta baixa capacidade tanto maior quanto maior o teor em diatomite. A utilização de um agente redutor de água de amassadura nos betões com diatomite aumenta a sua reatividade e consequentemente a capacidade de se ligar aos iões cloreto, diminuindo assim a sua concentração no interior das amostras.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho tinha como principal objetivo estudar o comportamento reológico de argamassas e betões, através da utilização de reómetros específicos e estabelecer uma correlação entre os resultados de reometria de ambos os materiais. Para além da correlação reológica, pretendia-se obter também uma correlação entre a resistência à compressão dos betões e das suas argamassas respectivas. Esperava-se assim também compreender a dependência entre as propriedades em fresco e no estado endurecido dos betões e argamassas correspondentes. Simultaneamente, este trabalho procurou também estudar o efeito de aditivos pozolânicos no comportamento reológico e no estado endurecido destes materiais cimentícios e, ainda, compreender qual a melhor forma de otimizar a utilização destes materiais. Considera-se que este objetivo foi cumprido como se verificou pelos resultados apresentados e discutidos nesta tese, os quais se destacam neste capítulo de conclusões.

O estudo do comportamento reológico de argamassas e betões iniciou-se com o estabelecimento duma argamassa padrão e de um betão padrão e da sua avaliação, para depois servir de base à análise do papel de componentes relevantes sobre a reologia, tal como o efeito da introdução do metacaulino e da diatomite em substituição parcial do cimento. A presença das pozolanas modificou a fluidez das argamassas e respectivos betões no sentido de um espessamento com notória quebra de trabalhabilidade. O efeito do teor da água de amassadura e o efeito de um adjuvante redutor de água de amassadura no controlo da trabalhabilidade de argamassas e betões com pozolanas também foi analisado através de análise reométrica.

Verificou-se por reometria que através da alteração do teor de água de amassadura se conseguiu ajustar o comportamento reológico das argamassas e garantir betões correspondentes dentro do intervalo de trabalhabilidade pretendido. Observando a variação dos parâmetros reológicos obtidos por reometria concluiu-se que, quando se usa a água como corrector de trabalhabilidade, a viscosidade é a propriedade com maior influência sobre o abaixamento do cone de Abrams comparativamente à tensão de cedência. Também se pode considerar que existe uma relação directa entre o comportamento reológico das argamassas e os betões correspondentes, nomeadamente, no que se refere ao

comportamento da viscosidade e da tensão de cedência. Pode-se afirmar que o comportamento reológico do betão é condicionado pelo comportamento da argamassa que lhe serve de base.

A utilização do agente redutor de água de amassadura, como elemento para ajustar a trabalhabilidade das diferentes composições à argamassa padrão, funciona com eficácia. No entanto, particularmente para quantidades elevadas desses materiais (30% de metacaulino ou 10% de diatomite), a ação moente dos agregados grossos durante a mistura do betão, garante uma desaglomeração que não é possível obter nas argamassas correspondentes e, conseqüentemente, a partir destes teores de pozolana o betão apresenta-se mais fluido do que o betão padrão, não se conseguindo a correlação direta entre os parâmetros reológicos das argamassas e dos betões. Contudo, até esse limite, existe uma relação direta entre o comportamento reológico das argamassas e os betões correspondentes.

É de salientar aqui que não é possível estabelecer uma correlação geral directa entre o comportamento em fresco e o comportamento no estado endurecido, pois formulações com o mesmo comportamento reológico podem apresentar propriedades diferentes no estado endurecido. Esta relação entre estes dois estados deve ser analisada em função de cada fator que pode influenciar o comportamento das formulações nos referidos estados.

Relativamente ao estudo da correlação entre a resistência mecânica de argamassas com pozolanas e os betões correspondentes no estado endurecido, verificou-se que para os betões com um abaixamento do cone de Abrams de 9 ± 1 cm, se verifica uma correlação com a maioria das argamassas correspondentes.

Concretamente, quando o ajuste de trabalhabilidade é efectuado através da alteração do teor de água de amassadura observou-se, para todas as composições, uma diminuição da resistência à compressão com o aumento do teor em pozolanas, tanto nas argamassas como nos respectivos betões. Esta diminuição, nas amostras com teores crescentes de metacaulino, é devida não só ao aumento do teor de água, mas principalmente ao aumento do teor em aglomerados com ar incluso no seu interior. Este efeito é mais visível para a composição com 30% de metacaulino. A resistência das argamassas com metacaulino é cerca de 84% da resistência dos respectivos betões, apresentando uma relação linear entre a resistência à compressão das argamassas e betões

correspondentes. As argamassas e betões com diatomite na sua composição, mostraram uma maior diminuição da resistência com o aumento do teor em pozolanas, devido à menor reactividade pozolânica da diatomite e à fraca ligação da diatomite com a matriz cimentícia promovendo sistemas muito porosos. Nas composições mistas de metacaulino com um teor fixo de 3% de diatomite, a presença da diatomite continua a causar uma diminuição dos valores da resistência. Quando se tem maiores teores de metacaulino nos betões (15 e 20%) esta diminuição de resistência face ao padrão é bastante menor devido à elevada reactividade pozolânica do metacaulino. Nas formulações em que a diatomite está presente não se verifica correlação entre a resistência das argamassas e betões correspondentes.

O uso de um agente redutor de água de amassadura (SP), como elemento para ajustar a trabalhabilidade das diferentes composições à argamassa padrão, promove a desaglomeração das partículas, aumentando assim a reatividade das pozolanas. Constatou-se assim que as argamassas e betões com este adjuvante apresentam, em geral, um aumento da resistência à compressão com o aumento do teor em material pozolânico. Relativamente ao metacaulino, devido à sua elevada reatividade pozolânica, o incremento da resistência com o aumento da quantidade de metacaulino é bastante significativa, tanto para as argamassas como para os betões correspondentes. Para diferentes teores em metacaulino, verifica-se uma correlação linear entre a resistência das argamassas e os betões correspondentes, sendo o valor da resistência das argamassas também cerca de 84% do valor da resistência dos respetivos betões.

No caso das argamassas e betões com diatomite, devido à baixa reatividade desta pozolana, não apresentam melhoria da resistência relativamente aos padrões. No entanto, pode-se considerar que a resistência se mantém com uma correlação entre os valores da resistência das argamassas e os dos betões correspondentes de cerca de 84%, embora não se verifique relação entre os valores da resistência das argamassas e dos betões.

As formulações mistas de metacaulino e diatomite mostram um aumento dos valores da resistência à compressão das argamassas e seus betões com o aumento do teor em metacaulino, embora esses valores sejam ligeiramente inferiores aos apresentados pelas composições apenas com metacaulino. Verifica-se uma relação linear entre os valores de resistência apresentados pelas argamassas e os apresentados pelos betões correspondentes,

sendo também os valores de resistência das argamassas de 85% dos valores dos betões correspondentes.

O efeito dos materiais pozolânicos sobre algumas propriedades no estado endurecido de betões foi também avaliado. Em síntese, em relação ao efeito do metacaulino e da diatomite sobre algumas propriedades (resistência mecânica e módulo de elasticidade) no estado endurecido de betões, é possível afirmar que depende do tipo de ajuste de trabalhabilidade do betão, dado que a introdução das pozolanas retira trabalhabilidade às misturas.

Assim, a utilização de água para o ajuste de trabalhabilidade traduz-se sempre numa diminuição da resistência mecânica e módulo de elasticidade com o aumento do teor em pozolana. Este efeito no betão com metacaulino deve-se principalmente a um aumento da porosidade causada pelo ar incluso nos aglomerados de partículas de metacaulino. Relativamente á diatomite, a diminuição de resistência deve-se a uma falta de coesão quer na matriz cimentícia, quer na interface matriz-agregados. Estes comportamentos são evidenciados e comprovados pelos ensaios de porosimetria e pela observação da microestrutura das amostras de betão.

Por outro lado, a utilização de um agente redutor de água de amassadura para o ajuste de trabalhabilidade, devido à sua ação de desaglomeração das partículas, tornando o sistema mais reativo, confere ao betão um aumento da resistência com o aumento do teor de pozolana, com consequente diminuição da porosidade, o que contribui para a manutenção dos valores do módulo de elasticidade. A diminuição da porosidade pode ser observada quer pelos resultados da porosimetria quer através da análise da microestrutura das diferentes amostras de betão. No entanto, como pode ser verificado pelos valores da resistência à compressão, a melhoria das propriedades em endurecido dos betões é mais evidente nas formulações com metacaulino do que nas composições com diatomite. Este facto deve-se á elevada reatividade pozolanica do metacaulino em contraste com a baixa reatividade pozolanica da diatomite, devido á sua menor velocidade de reação. Este facto é confirmado pelos resultados das análises térmicas ao ligante (cimento+pozolana), onde a diminuição do teor em portlandite é significativamente maior nos betões com metacaulino.

Finalmente também se avaliou o efeito dos materiais pozolânicos sobre a durabilidade dos betões, tendo em conta a ação dos cloretos. A elevada reatividade do metacaulino garante uma elevada quantidade de produtos da reação pozolânica que, por um lado, aumentam a capacidade de ligação aos iões cloreto e, por outro lado, densificam a matriz cimentícia dificultando a difusão dos mesmos. Consegue-se assim obter betões com maior durabilidade. Este efeito pode ser observado nas composições cujo ajuste de trabalhabilidade foi efetuado quer pelo agente redutor de água de amassadura quer através do teor de água de amassadura. Contudo, esta ação é mais eficaz quando na composição do betão está presente o agente superplastificante.

A baixa reatividade pozolânica da diatomite, devido a uma baixa velocidade de reação com a portlandite e o maior teor de porosidade que a diatomite introduz nas formulações com ajuste de trabalhabilidade pela água, faz com que os betões com esta pozolana apresentem menor capacidade na retenção dos cloretos, sendo esta tanto maior quanto maior o teor em diatomite. A utilização de um agente redutor de água de amassadura nos betões com diatomite, aumenta a sua reatividade e, consequentemente, a capacidade de se ligar aos iões cloreto, diminuindo assim a sua concentração no interior das amostras.

O trabalho realizado permitiu estabelecer uma correlação entre fatores que afetam o comportamento reológico e as propriedades no estado endurecido de argamassas e betões, relação esta que pode ser útil do ponto de vista da engenharia destes materiais e das suas formulações. Será interessante em termos de trabalho futuro de investigação nesta área continuar a explorar estas correlações para tipos de betões de comportamento e formulação diferente.

BIBLIOGRAFIA

- Aiad I., 2003, Influence of time addition of superplasticisers on the rheological properties of fresh cement pasts, *Cement and Concrete Research*, 33, 1229-1234.
- Ali Ergün, 2011, Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 25, 806-812.
- Allen T., 1997, *Particle Size Measurements*, 5th edition, Ed. Chapman & Hall, Great Britain.
- Alsayed S.H., 1998, Influence of superplasticiser, plasticizer and silica fume on the drying shrinkage of high-strength concrete subject to hot-dry field conditions, *Cement and Concrete Research*, 28, 1405-1415.
- Ambroise J., Murat M., Pera J., 1985, Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals V. Extension of the research and general conclusions, *Cement and Concrete Research*, 15, 261-268.
- Ambroise J., Murat M., Pera J., 1986, Investigations on synthetic binders obtained by middle temperature thermal dissociation of clay minerals, *Silicates Industriels*, 7, 99-107.
- Aminul I.L., 2008, Rheological behaviour of high performance concrete with mineral admixtures and their blending, *Construction and Building Materials*, 22, 2345-2354.
- Arandigoyen M., Pérez Bernal J.L, Bello Lopez M.A., Alvarez J.I., 2005, Lime pastes with different kneading water: pore structure and capillary porosity, *Applied Surface Science*, 252, 1449–1459.
- Arikan M., Konstantin Sobolev, Tomris Ertun, Asim Yeginobali, Pelin Turker, 2009, Properties of blended cements with thermally activated kaolin, *Construction and Building Materials*, 23, 62-70.
- Artelt C., Garcia E., 2008, Impact of superplasticizer concentration and of ultra-fine particles on the rheological behaviour of dense mortar suspensions, *Cement and Concrete Research*, 38, 633–642.

- Asaga K., Roy D.M., 1980, Rheological properties of cement mixes, V: The effects of time on viscometric properties of mixes containing superplasticizers - conclusions, *Cement and Concrete Research*, 10, 287–295.
- Asbridge A.H. Chadbourn., G.A., C.L. Page, 2001, Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars, *Cement and Concrete Research* 31(11), 1567-1572.
- Asbridge A.H., Page C.L., Page M.M, 2002, Effect of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars, *Cement and Concrete Research* 32(9), 1365-1369.
- Aydin A.C., Gul R., 2007, Influence of volcanic originated natural materials as additive on the setting time and some mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 21, 1277-1281.
- Bhatty J.I., Banfill P.G., 1984, A viscometric method of monitoring the effect of retarding admixtures on the setting of cement pasts, *Cement and Concrete Research*, 14, 64-72.
- Bai J., Wild S., Sabir B.B., 2003, Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater, *Cement and Concrete Research*, 33, 353–362.
- Bailey W.J., I. S. Weir, 1998, Investigation of Methods for Direct Rheological Model Parameter Estimation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 21, 1-13.
- Banfill P.G., Saunders D.C., 1981, On viscometric examination of cement pasts, *Cement and Concrete Research*, 11, 363-370.
- Banfill P.G., 1987, Feasibility study of a coaxial cylinders viscometer for mortar, *Cement and Concrete Research*, 17, 329-339.
- Banfill P.G., Use of the viscometer to study the rheology of fresh mortar, *Magazine of Concrete Research*, 42, 213-221, (1990).
- Banfill P.G., 1991, The rheology of fresh mortar, *Magazine of Concrete Research*, 43, 13-21.
- Banfill P.G., 1992, Structural breakdown and rheology of cement mortar, *Proc. 11th International Congress of Rheology*, 790-792.
- Banfill P.G., 1993, Structure and rheology of cement based materials, *Materials Research Society Symposium*.

- Banfill P.G., 1994, Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials, *Construction and Building Materials*, 8, 43-50.
- Banfill P.G., 1995, Applications of rheology in mortar production, *Proc. of British Masonry Society*, 7-12.
- Banfill P.G., 2003, The rheology of fresh cement and concrete - A review, *Proc. of 11th International Congress on the Chemistry of Cement*. 50-62.
- Banfill P.G., 2006, Rheology of fresh cement and concrete, *Rheology Reviews*, 61 - 130.
- Banfill P.G., 2011, Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures, *Construction and Building Materials*, 25, 2955-2960.
- Bamforth P.B., Price W.F., Emerson M., 1997, *International Review of Chloride Ingress Into Structural Concrete*, Ed. by TRL Scotland, Heriot-Watt University Research Park, Edinburgh, Scotland.
- Barrak E. M., Mouret M., Bascoul A., 2009, Self-compacting concrete paste constituents: Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste, *Cement and Concrete Composites*, 31, 12–21.
- Bartos P., 1992, *Fresh Concrete: Properties and Tests*, Elsevier.
- Bentz D.P., Ferraris C.F., Galler M.A., Hanser A.S., Guynn J.M., 2012, Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement fly ash pastes, *Cement and Concrete Research*, 42, 404-409.
- Beaupré D., 1994, *Rheology of High Performance Shotcrete*, PhD Thesis, Univ. of British Columbia, Canada.
- Billberg P., 1999, Fine mortar rheology in mix design of SCC, Ed. A. Skarendahl and O. Petersson, *Proceedings of 1st International RILEM symposium on self-compacting concrete*. Stock (Sweden): RILEM Publications SARL, 47-58.
- Bourdette B., Ollivier J.P., Revertegat E, 1995, Transfer properties of interfacial transition zones and mortars, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 370, pp. 449–455.
- Bredy P., Pera M. C, J., 1989, *Microstructural and porosity of metakaolin blended cements*, Materials Research Society.
- Cassagnabère F., Escadeillas G., Mouret M., 2009, Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 775–784.

- Chandra S., 2002, Influence of cement and superplasticisers type on the fluidity of cement mortars_part I, *Cement and Concrete Research*, 32, 1605-1611.
- Chandra S., 1997, *Waste materials used in concrete manufacturing*, Westand (NY, USA), Noyes Publications, 242-243.
- Chandra S., Björnström J., 2002, Influence of superplasticiser type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars- Part II, *Cement and Concrete Research*, 32, 1613-1619.
- Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li, 2010, A review: the comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements, *Cement and Concrete Research*, 40, 1341-1349.
- Chidiac S.E., Maadani O., Razaqpur A.G., Mailvaganam N.P., 2003, Correlation of rheological properties to durability and strength of hardened concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (4), 391–399.
- Chidiac S.E., Mahmoodzadeh F., 2009, Plastic viscosity of fresh concrete – A critical review of predictions methods, *Cement and Concrete Composites*, 31, 535-544.
- Collin V., Jézéquel P.H., 2009, Mixing of concrete or mortars: Distributive aspects, *Cement and Concrete Research*, 39, 678–686.
- Copeland L.E., R.H.B, 1955, Self-desiccation in Portland cement pastes, *Bulletin 52*, Chicago, Research Laboratories of Portland Cement Association, ASTM Bulletin n° 204.
- Coutinho A.S., 1997, *Fabrico e propriedades do Betão*, volume I, Ed. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- De Larrard F., C. Hu, J. C. Sztikar, M. Joly, F. Claux and T. Sedran, 1995, A new Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete, LCPC internal report.
- De Larrard F., 1993, Optimization of HPC, *Micromechanics of Concrete and Cementitious Composites*, ed. Huet, SwZTlerland.
- De Larrard₁ F., C. F. Ferraris, and T. Sedran, 1998, Fresh Concrete: A Herschel-Buckley Material, *Materials Structure*, **31**, 494-498.
- De Larrard₂ F., C.F. Ferraris, 1998, Rhéologie du béton frais remanie III: L’essai au cône d’Abrams modifié’, *Bulletin des Laboratoire des Ponts et Chaussées (France)*, No. 215, pp. 53-60.

- Degirmenci N., Yilmaz A., 2009, Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars, *Construction and Building Materials*, 23, 284-288.
- Diamond S., 1997, Alkali silica reactions- some paradoxes, *Cement and Concrete Composites*, 19,391-401.
- Diamond S., Huang J., 2001, the ZTI in concrete- a different view based on image analysis and SEM observations, *Cement and Concrete Composites*, 23, 179-188.
- Emoto T., Bier T.A., 2007, Rheological behavior as influenced by plasticizers and hydration kinetics, *Cement and Concrete Research*, 37, 647–654.
- Feldman R.F., Sereda P.J., 1968, A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties, *Materials and Structures*, 1, 509–520.
- Fernandes V., Silva L., Ferreira V.M., Labrincha J.A., 2005, Influence of the kneading water content in the behaviour of single-coat mortars, *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1900-1908.
- Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R., 2001, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, 31(2), 245-255.
- Ferraris₁ C. F., 1999, Measurement of rheological properties of cement past: a new approach, *Journal of Research of the National Institute of standards and Technology*, 104, 461-478.
- Ferraris₂ C. F, 1999, Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104, 5, 46.
- Ferraris₃ C. F., De Larrard F., 1998, Testing and Modelling of Fresh, Concrete Rheology, NISTIR 6094.
- Fonseca A.T., 2000, *Tecnologia do Processamento Cerâmico*, Lisboa, Ed. Universidade Aberta.
- Fragoulis D., Stamatakis M.G., Papageorgiou D., Chaniotakis E., 2005, The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures, *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 205-209.

- Galias J.L., R.K.A., Bigas J.P., 2000, The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 30, 1543-1549.
- Glasser F.P., Marchand J., Samson E., 2008, Durability of concrete - Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and Concrete Research*, 38(2), 226-246.
- Glasser F.P., Marchand J., Samson E., 2008, Durability of concrete- degradation phenomena involving detrimental reactions, *Cement and Concrete Research*, 38, 226-246.
- Golaszewski J.S., 2004, Influence of superplasticisers on rheological behaviour of fresh cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, 24, 235-248.
- Golaszewski J.S., 2007, Rheology of fresh mortars and fresh concrete mixtures, *Concrete Technology*, 6, 42–51.
- Golaszewski J.S., 2008, Influence of mortar volume on rheological properties, *Concrete Technology*, 10, 44–51.
- Gonçalves M.C., Margarido F., 2012, *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*, Ed. IST Press.
- Greim M., 1997, Rheological measurements of building materials - a comprehensive research program, *Annual Trans. Nord. Rheology Society*, 5, 13.
- H. Okamura e M.Ouchi, 2003, Self-compacting concrete, *Journal Advance Concrete Technology*, 5-15.
- Helmuth R.A., 1980, Structure and rheology of fresh cement paste, *Proc 7th Intl. Cong. Chemical Cement*, Paris, VI.0, 16, 16–30.
- Hewlett P.C., 2001, *Lea's Chemistry of cement and concrete*, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Hiemenz P.C., 1977, *Principles of Colloid and Surface Chemistry*, Marcel Dekker Inc.
- Idorn G.M., 2005, Innovation in concrete research - review and perspective, *Cement and Concrete Research*, 35, 3-10.
- Jézéquel P.H., Collin V., 2007, Mixing of concrete or mortars: Dispersive aspects, *Cement and Concrete Research*, 37, 1321–1333.
- Kastis D., Kakali G., Tsivilis S., Stamatakis M.G., 2006, Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite, *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1821-1826.

- Khatib J.M., S.W, 1996, Pore size distribution of metakaolin paste, *Cement and Concrete Research*, 26, 1545–1553.
- Khatib J.M., Clay R.M., 2004, Absorption characteristics of metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 34(1), 19-29.
- Khatib J.M., 2008, Metakaolin concrete at a low water to binder ratio, *Construction and Building Materials*, 22(8), 1691-1700.
- Khayat K.H., M.S.C., Liotta I.F., 2002, Influence of thixotropy on stability characteristics of cement grout and concretes, *ACI Materials Journal*, 99(3), 234-241.
- Kim H.S., Lee S.H., Moon H.Y., 2007, Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin, *Construction and Building Materials*, 21, 1229-1237.
- Kismi M., Saint-Arroman J.C., Mounanga P., 2012, Minimizing water dosage of superplasticized mortars and concretes for a given consistency, *Construction and Building Materials*, 28, 747–758.
- Kosmatka S.H., Panarese W.C., 1994, *Design and Control of Concrete Mixtures*, PCA.
- Kovler K., Roussel N., 2011, Properties of fresh and hardened concrete, *Cement and Concrete Research*, 41, 775–792.
- Lagier F., Kurtis K.E., 2007, Influence of Portland cement composition on early age reactions with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 37(10), 1411-1417.
- Lamechi M., Hossain K.M.A, Patel R., Shehata M., Bouzoubaâ N., 2007, Influence of paste/mortar rheology on the flow characteristics of high-volume fly ash self-consolidating concrete, *Mag. Concrete Research*, 59, 517-528.
- Lawrence R.M., Timothy J. Mays, Sean P. Rigby, Peter Walker, Dina D'Ayala, 2007, Effects of carbonation on pore structure of non-hydraulic lime mortars, *Cement and Concrete Research*, 37, 1059–1069.
- Leivo M., 1990, *Rheological Modeling of the Compaction Properties of Concrete*, H. J. Wierig, ed., *Properties of Fresh Concrete*, Proc. of the Coll. RILEM, Chapman and Hall.
- Lo Tommy Y., Cui H.Z., Tang W.C., Leung W.M., 2008, The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 22, 623–628.

- Luc Courard, Darimont A., Schouterden N.M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R., 2003, Durability of mortars modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 33, 1473-1479.
- Mahaut F., Mokéddem S., Chateau X., Roussel N., Ovarlez G., 2008, Effect of coarse particle fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 38, 1276-1285.
- Martin-Perez B., Zibara H., Hooton R.D., Thomas M.D.A, 2000, A study of the effect of chloride binding on service life predictions, *Cement and Concrete Research*, 30, 1215– 1223.
- Mehta K.P., Monteiro P.J.M., 2005, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3, Ed. McGraw-Hill Professional.
- Mitchell D.R.G., Hinczak I., Day R.A, 1998, Interactions of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pasts, *Cement and Concrete Research*, 28, 1571-1584.
- Mitsui K., Zongjin L., Lange D.A, Shah S.P., 1992, A study of properties of the paste aggregate interface, *Proc. Int. RILEM Conf.*, 21± 23 Oct., Toulouse, France, E&FN Spon, London, pp. 119-128.
- Moisés Frias, Cabrera J., 2000, Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin- cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 30, 561-569.
- Mostafa N.Y, Mohsen Q., El-Helmaly S.A.S., El-Korashy S.A., Brown P.W., 2010, High replacements of reactive pozzolan in blended cements: Microstructure and mechanical properties, *Cement and Concrete Composites*, 32, 386-391.
- Mostafa N.Y., El-Hemaly S.A.S., Al-Wakeel E.I., El-Korashy S.A., Brown P.W., 2000, Characterization and evolution the pozzolanic activity of Egyptian industrial by products: I. silica fume and dealuminated kaolin, *Cement and Concrete Research*, 31, 467-474.
- Nabajyoti S., Shigeru K., Toshinori K., 2006, Thermogravimetric investigation on the chloride binding behaviour of MK–lime paste, *Thermochimica Acta*, 444, 16–25.
- Nabil M. Al-Kakhras, 2006, Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, *Cement and Concrete Research*, 36, 1727-1734.
- Neville A.M., 1975, *Properties of Concrete*, Ed. Pitman Publishing, London.

- Ng I.Y.T., Ng P.L., Kwan A.K.H., 2009, Rheology of mortar and its influences on performance of self-consolidating concrete, *Key Engineering Materials*, v. 400-402, p. 421-426.
- Okamura H., Ouchi M., 2003, Self-compacting concrete, *Journal Advance Concrete Technology*, 5-15.
- Orban J., Parcevaux P., Guillot D., 1986, Influence of shear history on the rheological properties of oil well cement slurries, in: *Proc. 8th Intl. Cong. Chem. Cem.*, Rio de Janeiro. VI.3, 243–247.
- Paiva H., Esteves L.P., Cachim P.B., Ferreira V.M., 2009, Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents, *Construction and Building Materials*, 23, 1441-1446.
- Paiva H., Velosa A., Cachim P., Ferreira V.M., 2012, Effect of metakaolin dispersion on fresh and hardened state properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, 42, 607-612.
- Papadakis V.G., Antiohos A., Tsimas S., 2002, Supplementary cementing materials in concrete. Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor, *Cement and Concrete Research*, 32, 1533-1538.
- Papadakis V.G., 2000, Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash, *Cement and Concrete Research*, 30, 164.
- Papadakis V.G., Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 79, (1999).
- Pappo A., 2004, Effect of various superplasticisers on the rheological properties of Portland cement pasts, *Cement and Concrete Composites*, 34, 2097-2101.
- Parande A. K., Babu B., Karthik M.A., Kumar D. K.K., Palaniswamy N., 2008, Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar, *Construction and Building Materials*, 22, 127–134.
- Pierre-Claude Aïtcin, 2000, Cements of yesterday and today concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, 30, 1349-1359.
- Powers T.C., 1960, Physical properties of cement paste, *Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington.
- Powers T.C., 1968, *Properties of fresh concrete*, Wiley, New York.

- Prokopski G., Halbiniak J., 2000, Interfacial transition zone in cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 30(4), 579-583.
- Rahhal V., Talero R., 2009, Calorimetry of Portland cement with silica fume, diatomite and quartz additions, *Construction and Building Materials*, 23, 3367-3374.
- Reddy B.V.V., Gupta A., 2008, Influence of sand grading on the characteristics of mortar and soil-cement block masonry, *Construction and Building Materials*, 22, 1614-1623.
- Rixom R., Mailvaganam N., 1999, *Chemical Admixtures for Concrete*, Ed. E&FN Spon, London.
- Rodríguez-Camacho R.E., Uribe-Afif R., 2002, Importance of using the natural pozzolans on concrete durability, *Cement and Concrete Research*, 32, 1851-1858.
- Roussel N., 2006, A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications, *Cement and Concrete Research*, 36, 1797-1806.
- Russell H.G., 1999, ACI Defines High-Performance Concrete, *Concrete International*, 21, 56-57.
- Sabir B.B., Wild S., Bai J., 2001, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, 23, 441-454.
- Saito M., Kawamura M., 1992, Effects of sodium chloride on the hydration products in the interfacial zone between cement paste and alkali reactive aggregate, *Proc. Int. RILEM Conf.*, 21± 23 Oct. 1992, Toulouse, France, E&FN Spon, London, pp. 33-41.
- Saikia N., Kato S., Kojima T., 2006, Thermogravimetric investigation on the chloride binding behaviour of MK–lime paste, *Thermochimica Acta*, 444, 16–25.
- Seabra M.P., Paiva H., Labrincha J.A., Ferreira V.M., 2009, Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars, , *Construction and Building Materials*, 23, 1147-1153.
- Sebok T., 1999, Relationships between the properties of ligninsulphonates and parameters of modified samples with cement binders-part II, *Cement and Concrete Research*, 29, 591-594.
- Scrivener K.L., Pratt P.L., 1996, Characterization of interfacial microstructure, in: J.C. Maso (Ed.), *Interfacial Transition Zone in Concrete*, RILEM Report 11, E & FN Spon, London.

- Senff₁ L., Labrincha João A., Ferreira V. M., Hotza D., Repette W. L., 2009, Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials*, 23, 2487-2491.
- Senff₂ L., Barbetta P.A., Repette W. L., Hotza D., Paiva H., Ferreira V. M., J. A. Labrincha, 2009, Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments, *Construction and Building Materials*, 23, 3107-3111.
- Sensale, G.R., 2006, Strength development with rice-husk ash, *Cement and Concrete Composites*, 28, 158-160.
- Shi C., Xie P., 1998, Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research*, 28(6), 887-896.
- Siddique R., Klaus J., 2009, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400.
- Smith W.F., 1996, *Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, Ed. McGraw-Hill Inc., Lisboa.
- Spoon C.S., Kou S.C, Lam L., 2006, Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, *Construction and Building Materials*, 20, 858-865.
- Stamatakis M.G., D. F., Csirik G., Bedeleian I., Pedersen S., 2003, The influence of biogenic-silica-rich rocks on the properties of blended cements, *Cement and Concrete Composites*, 25, 177-184.
- Stroeven P., Stroeven M., 2001, Reconstructions by SPACE of the Interfacial Transition Zone, *Cement and Concrete Composites*, 23(2-3), 189-200.
- Struble L., 1995, Viscosity of a Portland cement past as a function of concentration, *Advance on Cement Based Materials*, 2, 62-69.
- Sujata K., Jennings H.M, 1992, Formation of a protective layer during the hydration of cement, *Journal of American Ceramic Society*, 75, 1669–1673.
- Tattersal G.H., Banfill P. G, 1983, *The rheology of fresh concrete*, London, Pitman.
- Tattersall G. H., 1976, *The workability of concrete*, A Viewpoint Publication, PCA.
- Taylor H.F.W., 1972, *The chemistry of cements*, volume I, Ed. Academic Press Inc., London.

- Torgal F.P., Gomes J.C., Jalali S., 2008, Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22, 1305–1314.
- Tsai Wen-Tien, Lai Chi-Wei, Hsien, 2006, characterization and absorption of diatomaceous earth modified by hydrofluoric acid etching, *Journal of Colloid and Interface Science*, 297, 749-754.
- Tsuneki I., 2009, Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolan effect, *Cement and Concrete Research*, 39, 716-726.
- Van Balen K., 1994, Modeling lime mortar carbonation, *Materials and Structures*, 27, 393-398.
- Van Balen K., 2005, Carbonation reaction of lime, kinetics and ambient temperature, *Cement and Concrete Research*, 35, 647-657.
- Wallevik O. H., Gjorv O. E., 1988, Rheology of Fresh Concrete, *Advances in Cement Manufacture and Use*, Eng. Found. Conf. Potosi, MI, p. 133.
- Westerholm M., Laberblad B., Silfwerbrand J., Forssberg E., 2008, Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortar, *Cement and Concrete Composites*, 30, 274-282.
- Wierig H. J., 1990, Properties of Fresh Concrete, *Proc. of the Coll. RILEM*, Chapman and Hall.
- Wild S., Khatib J.M., Jones A., 1996, Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1537-154.
- Wild S., Khatib J.M., 1997, Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, 27(1), 137-146.
- Williams D.A., Saak A.W., Jennings H.M, 1999, The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste, *Cement and Concrete Composites*, 29, 1491-1496.
- Yang M., Jennings H.M., 1995, Influence of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste, *Advances on Cement Based Materials*, 2, 70–78.
- Yilmaz B., Ediz N., 2008, The use of raw and calcined diatomite in cement production, *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 202-211.

Young J.F., Mindess S., Gray R.J., Bentur A., 1998, The Science and the Technology of Civil Engineering Materials, Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey.
